This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

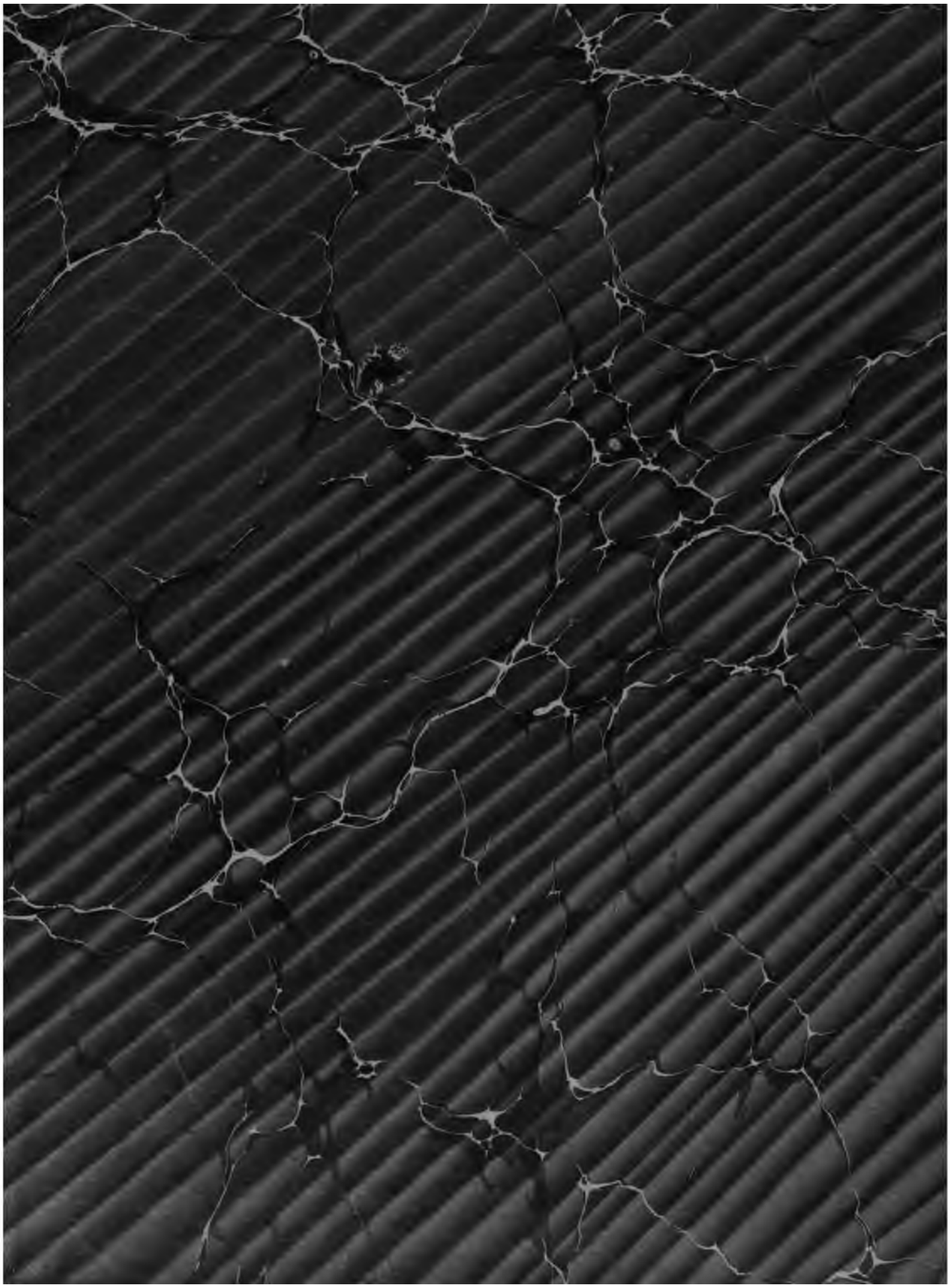
+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

The Branner Geological Library

LELAND·STANFORD·JVNIOR·VNIVERSITY



551.6
D236

Monsieur Danton.

Directeur au Ministère de l'Instruction publique.

par - ordre

honneur de l'auteur A. Daubrée.

ÉTUDES

ET

EXPÉRIENCES SYNTHÉTIQUES

SUR

LE MÉTAMORPHISME.

EXTRAIT DU TOME XVII

DES MÉMOIRES PRÉSENTÉS PAR DIVERS SAVANTS

À L'ACADÉMIE DES SCIENCES.

J C Branner

ÉTUDES

ET

EXPÉRIENCES SYNTHÉTIQUES

SUR

LE MÉTAMORPHISME

ET SUR LA FORMATION DES ROCHES CRISTALLINES,

PAR M. DAUBRÉE,

INGÉNIEUR EN CHEF DES MINES,

DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES DE STRASBOURG,

OFFICIER DE LA LÉGION D'HONNEUR, ETC.

PARIS.

STANFORD LIBRA

IMPRIMERIE IMPÉRIALE.

—

M DCCC LX.

4T

211355

STANFORD LIBRARY

EXTRAIT

DU RAPPORT FAIT A L'ACADÉMIE DES SCIENCES

(INSTITUT DE FRANCE)

SUR LE CONCOURS DU PRIX BORDIN,

LU DANS LA SÉANCE PUBLIQUE DU 30 JUIN 1860.

COMMISSAIRES :

MM. ÉLIE DE BEAUMONT, CORDIER, DELAFOSSE, CH. SAINTE-CLAIRE DEVILLE, DE SÉNARMONT, RAPPORTEUR.

PRIX PROPOSÉ EN 1856 POUR 1857 ET REMIS A 1859.

La question du *métamorphisme des roches*, que l'Académie avait proposée pour sujet du prix Bordin, dans sa séance du 2 février 1856, et remise au concours dans sa séance du 8 février 1858, avait été posée dans les termes suivants :

« Les auteurs devront faire l'historique des essais tentés, depuis la fin du siècle dernier, pour expliquer, par un dépôt sédimentaire, suivi d'une altération plus ou moins grande, l'état dans lequel se présentent à l'observation un grand nombre de roches.

« Ils devront résumer les théories physiques et chimiques proposées pour l'explication des faits de ce genre, et faire connaître celles qu'ils adoptent.

« L'Académie leur saura gré surtout des expériences qu'ils auront exécutées pour vérifier et pour étendre la théorie des phénomènes métamorphiques.

. . . . . .

« L'auteur du mémoire n° 1 a traité son sujet d'une manière plus large et en même temps plus concise. Il commence par esquisser à grands traits l'histoire des premières spéculations géogéniques, et de la géologie à la fois observatrice et théorique qui date de Hutton et de Wer-

ner. Il la suit dans ses transformations, dans ses progrès, et complète ce tableau par l'exposé des expériences synthétiques ingénieusement inaugurées par les travaux de Hall.

« Le second chapitre rappelle les faits divers, dont l'ensemble constitue aujourd'hui le métamorphisme, et qui attendent toutes les théories comme autant d'épreuves préparées à l'avance. Pressé sans doute par le temps, craignant peut-être aussi d'insister sur des observations connues et maintenant incontestées, l'auteur a trop abrégé ce second chapitre. Les faits étaient ici la démonstration nécessaire de la réalité des phénomènes qu'il s'agissait d'expliquer; et on doit regretter qu'après avoir si bien présenté l'histoire de la question, il ait négligé d'en développer suffisamment les pièces justificatives.

« Le troisième chapitre est consacré à l'examen des causes possibles et probables du métamorphisme. Ces causes y sont successivement soumises à une discussion raisonnée, et à l'épreuve d'une série d'expériences synthétiques très-variées et très-instructives, instituées et exécutées par l'auteur. Il trouve de plus, dans une étude approfondie des phénomènes qu'ont produit et que produisent encore de nos jours certaines sources thermales, notamment celles de Plombières, d'autres expériences toutes faites, avec l'aide du temps, cet élément essentiel qui manque toujours aux essais du laboratoire, et il en met habilement en relief toutes les conséquences.

« Revenant alors sur ses pas, il établit, dans un dernier chapitre, un grand nombre de rapprochements ingénieux entre les phénomènes universellement attribués au métamorphisme et ceux qu'il vient de constater, soit dans ses propres expériences, soit dans ses observations sur les sources thermales.

« C'est alors qu'il développe, sur l'origine et les agents principaux de ces transformations, l'ensemble des vues théoriques qui lui paraissent être la conclusion nécessaire et en quelque sorte le couronnement des notions aujourd'hui acquises à la science.

« Ces chapitres sont un habile enchaînement d'inductions logiques, d'observations, d'expériences de toute nature parfaitement dirigées; ils sont remplis de faits et d'idées propres à l'auteur,; et quoique ses con-

clusions et ses doctrines soient déjà anciennes dans la science, il a su les rajeunir par la nouveauté des preuves et des aperçus dont elles sont entourées.

« Il termine son mémoire par un appendice, où il étend les mêmes théories au métamorphisme supposé des terrains stratifiés anté-siluriens. Il ne dissimule pas, d'ailleurs, tout ce que cette extension a d'hypothétique, puisqu'il s'agit de roches qui ont dû se former ou se modifier dans des conditions absolument différentes de celles qu'il nous est donné d'observer et de reproduire. Cette réserve est une préparation judicieuse à de pures spéculations, mais celles-ci n'en renferment pas moins des considérations très-dignes d'intérêt, et quelques-uns de ces rapprochements curieux qui se présentent seulement à un esprit méditatif, capable à la fois de la hardiesse qui imagine et de la prudence qui réduit les imaginations à leur juste valeur.

. . . . . .

« Ce que l'Académie peut et doit récompenser, ce sont des vues originales, c'est un judicieux emploi de l'induction et de l'expérience, du raisonnement et de l'observation, c'est un nouvel exemple des méthodes expérimentales et de leur rigueur appliquées à des recherches où on les avait trop souvent négligées; c'est enfin une longue persévérance dans des travaux désintéressés, pénibles et souvent dangereux.

. . . . . .

« L'auteur du mémoire n° 1 est M. Daubrée, ingénieur en chef des mines, doyen et professeur de géologie à la Faculté des sciences de Strasbourg. »

ÉTUDES

ET

EXPÉRIENCES SYNTHÉTIQUES

SUR

LE MÉTAMORPHISME

ET SUR LA FORMATION DES ROCHES CRISTALLINES.

In varietate unitas.
LEIBNITZ.

INTRODUCTION.

Une des premières et des plus importantes questions que la géologie ait été appelée à résoudre, c'est de reconnaître quelle est, dans la formation du revêtement solide du globe, la part de l'action aqueuse et la part de l'action ignée. Quoique débattue depuis longtemps, elle n'a pas encore reçu de solution définitive; elle s'est même compliquée, depuis qu'en étudiant plus rigoureusement les divers terrains, on en a trouvé partout qui présentent manifestement l'empreinte d'une double origine. Est-ce au moment même où ils se sont formés que ces terrains ambigus ont acquis leur double caractère, ou bien l'un de ces caractères est-il consécutif à l'autre; et, dans ce dernier cas, comment se rendre compte d'une telle succession d'effets? Tels sont les sujets dont l'étude constitue, dans sa plus grande généralité, la partie de la géologie que l'on a appelée *métamorphisme*.

Quand les réactions que les régions intérieures du globe exercent sur sa surface se manifestent par des phénomènes journaliers, comme les sources thermales, les éruptions de volcans, les tremblements de terre, ou par des effets dont l'homme n'a pas été témoin, mais dont il retrouve les traces grandioses, comme les éruptions de roches, le soulèvement des chaînes de montagnes, c'est un sujet plein d'attrait et dont chacun s'occupe très-volontiers. Mais quand ces mêmes réactions n'ont produit que des modifications lentes, occultes, inaccessibles à l'observation directe par la profondeur à laquelle elles ont eu et ont lieu sans doute encore aujourd'hui, on conçoit qu'elles excitent incomparablement moins l'intérêt, et qu'elles présentent, d'ailleurs, des difficultés particulières d'investigation. Cependant, si l'on considère que ces grandes transformations se sont exercées sur une portion notable de l'écorce terrestre; que, selon toute probabilité, leur importance s'accroît à partir de la surface, au point qu'elles deviennent prédominantes dans les profondeurs; que, d'ailleurs, elles sont en connexion intime avec toutes les autres manifestations de l'activité interne du globe, il faut reconnaître que leur étude mérite bien la plus sérieuse attention.

C'est cette étude du phénomène, tel qu'il nous est possible de le comprendre aujourd'hui, que je présente dans ce travail. Je le diviserai en trois parties : la première sera consacrée à l'historique; la deuxième, à l'exposition des faits que l'on peut considérer comme acquis, et auxquels devront satisfaire les explications théoriques qui forment le sujet de la troisième partie.

J'ai donné un certain développement à la pârtie historique. Signaler les efforts par lesquels ont été graduellement conquises les idées théoriques que nous possédons aujour-

d'hui n'est pas seulement un juste hommage rendu à ceux qui ont éclairé la science par leurs travaux; c'est aussi un avertissement salutaire contre les illusions spéculatives. Les entraînements de l'imagination sont d'autant plus à redouter dans le domaine de la géologie, que l'induction fondée sur l'observation y manque le plus souvent d'un contrôle.

Quoique les citations historiques soient nombreuses, elles présentent encore bien des lacunes; mais, pour ne pas trop allonger cet aperçu, j'avertis que je me restreins aux travaux fondamentaux.

PREMIÈRE PARTIE.

HISTORIQUE.

CHAPITRE PREMIER.

ÉTAT DE LA GÉOLOGIE À L'APPARITION DU SYSTÈME DE HUTTON.

Idées géologiques jusqu'à la fin du XVIIIe siècle. Descartes, Leibnitz, Buffon.

Il y a eu, dans ces deux derniers siècles, des hommes qui, sans être ce qu'on appelle maintenant des géologues, ont émis sur le système du globe des idées tellement remarquables, qu'ils ont eu une influence incontestable sur les travaux de ceux qui, depuis lors, ont spécialement étudié cette partie de la science.

Ainsi Descartes considéra la terre comme un astre refroidi à sa surface, qui conserve dans son intérieur un *feu central,* cause du retour des eaux d'infiltration vers la surface, de l'arrivée des métaux dans les filons, et des dislocations de l'enveloppe solide[1].

De cette même hypothèse d'une fluidité initiale, Newton déduisit, par le calcul, l'aplatissement que devait présenter le sphéroïde terrestre[2].

[1] Les Principes de la philosophie de Descartes ont paru d'abord en 1644. (Édition latine d'Amsterdam.) Le génie perçant de Descartes a deviné plusieurs faits généraux que l'observation a plus tard établis.

« Feignons que cette terre a été autrefois un astre... en sorte qu'elle ne différait en rien du soleil, sinon qu'elle était plus petite... Au-dessus de la croûte intérieure fort pesante, de laquelle viennent tous les métaux, est une croûte de terre moins massive, qui est composée de pierres, d'argile, de sable et de limon... Ce n'est pas le seul argent-vif qui peut amener soit les métaux de la terre intérieure à l'extérieur, les esprits et les *exhalaisons* font le semblable aux regards de quelques-uns, comme le cuivre, le fer et l'antimoine. » (Édition française de 1668, IVe partie, §§ 2, 44 et 72.)

[2] *Principia mathematica philosophiæ naturalis*, 1687.

Plus tard, Leibnitz, s'inspirant à la fois des idées de Descartes et des observations si judicieuses de Stenon, écrivit un ouvrage qui, malgré la rareté inévitable des faits sur lesquels il repose, porte toute l'empreinte du génie qui l'a conçu[1].

C'est à cette source, on ne peut le méconnaître, que l'illustre auteur des Époques de la nature puisa ses inspirations les plus profondes.

Les ouvrages de Buffon, tout en excitant au plus haut degré l'attention, ne pouvaient cependant convaincre; mais ils frappèrent l'imagination de la manière la plus vive, et, par suite, ils provoquèrent des observations précises, destinées à résoudre les doutes qu'ils avaient soulevés[2].

Ère de la géologie positive; de Saussure, Pallas et Werner.

Ce n'est, en effet, qu'à la fin du siècle dernier, à l'époque même où la chimie voyait s'ouvrir un horizon si nouveau, surtout par les découvertes des Lavoisier, des Schèele, des Priestley, des Cavendish, que l'histoire du globe commença aussi à se dégager des systèmes préconçus, et que l'observation tendit à y prendre la place qui lui appartient. Les faits exacts que des hommes doués du génie d'observation, tels que Agricola, Bernard de Palissy, Stenon, avaient signalés antérieurement, étaient restés comme noyés dans un océan d'hypothèses. Les notions sur l'histoire de la terre que publia l'émule de Buffon comme historien de la nature, Linné, ne présentent que le résumé des faits connus et des idées qui avaient cours à cette époque[3].

[1] Leibnitz donna un premier aperçu de la dissertation connue sous le nom de *Protogæa* dans les *Acta eruditorum*, au mois de janvier 1693; mais ce n'est que trente-trois ans après sa mort, en 1749, l'année même où Buffon fit paraître les trois premiers volumes de l'Histoire naturelle, que la *Protogæa* parut en entier. Cet ouvrage remarquable n'a été traduit en français que tout récemment par M. le docteur Bertrand de Saint-Germain. La Théorie de la terre date de 1749. Les Époques de la nature ne parurent que près de trente ans plus tard, en 1778. Avant Buffon, Mairan avait développé l'idée de la chaleur centrale à un point de vue particulier.

[2] L'influence que Buffon a exercée sur les progrès de la géologie a été hautement reconnue par M. Élie de Beaumont. (*Leçons de géologie pratique*, p. 24.)

[3] *Systema naturæ*, 1775.

De Saussure[1], Pallas[2] et Werner inaugurèrent, par des travaux à peu près contemporains, l'ère de la *géologie positive*, et tous trois, désapprouvant avant tout la hardiesse de Buffon, réagirent contre ses idées, même dans ce qu'elles avaient de fondé[3]. Les deux premiers savants, éminemment observateurs, étaient sobres d'inductions. Mais Werner alla plus loin : il chercha à analyser, à classer, à coordonner les faits, à les décrire dans un langage fixe et précis, et donna à la science le nom de *géognosie*, pour l'opposer à la *géologie*, qui jusqu'alors n'avait guère été qu'un assemblage de conjectures[4].

Système de Werner ou école de Freyberg.

Pour nous reporter aux doctrines qui régnaient quand les idées de métamorphisme ont apparu, nous devons d'abord rappeler les principes fondamentaux du célèbre professeur de Freyberg, notamment ceux qui ont disparu devant les découvertes postérieures.

D'après Werner, le granit et les autres roches cristallines sont des dépôts de la mer, tout aussi bien que les roches stratifiées et fossilifères. A une époque reculée, les diverses matières dont dérivent ces terrains ont été, soit dissoutes, soit en suspension dans l'Océan. C'est de cet océan *chaotique* que se sont successivement séparés tous les terrains, les uns par voie chimique, les autres par voie mécanique. Cette dernière différence de formation distingue les roches cristallines des roches sédimentaires.

[1] De Saussure, né en 1740, commença ses voyages en 1760, et publia, en 1779, les premiers volumes de ses Voyages dans les Alpes, où il a consigné tant de faits importants qui ont servi comme de fondements à la géologie.

[2] Pallas publia, en 1777, ses Observations sur les montagnes, et, peu d'années après, la relation de ses longs voyages.

[3] Ces trois grands observateurs admettaient, comme l'avait fait Linné, que tous les terrains ont été formés par voie aqueuse, et que les phénomènes volcaniques sont de purs accidents locaux. De Saussure déclarait, en 1798, après avoir visité l'Auvergne, qu'il ne pouvait admettre que le basalte ait été formé par le feu ; à plus forte raison repoussait-il cette opinion pour le granit.

[4] A l'aide de faits positifs, que Füchsel avait déjà en partie signalés dès 1762, Werner montra qu'on pouvait établir une sorte de chronologie des événements physiques qui ont concouru à la structure du globe.

D'après ce système, le granit, qui compose les cimes les plus élevées du globe, et qui, en outre, supporte les terrains régulièrement stratifiés, a été formé le plus anciennement, ainsi que le gneiss et les roches schisteuses cristallines, qui lui sont souvent associés. Comme on n'y trouve jamais de débris organiques, la formation de ces terrains a dû précéder l'existence des animaux et des végétaux, ce qui leur a valu le nom de *primitifs*.

Plus tard, la mer diminua de hauteur en se retirant dans des cavités intérieures du globe[1]. Pendant cette seconde période elle continuait à opérer une précipitation chimique de silicates; mais en même temps elle commença aussi à former des dépôts mécaniques. C'est par ce double procédé chimique et mécanique qu'ont pris naissance les terrains de *transition* ou *intermédiaires*, qui renferment en effet des roches cristallines associées à des roches sédimentaires contenant des fossiles.

Dans une nouvelle période de décroissement des eaux se sont formés les terrains *secondaires*, dont les montagnes élevées n'atteignent jamais, supposait-on alors, l'altitude des cimes des terrains plus anciens. Ils sont souvent en couches horizontales et abondent en débris organiques.

Pendant leur consolidation, les terrains ont éprouvé des ruptures, d'où sont résultées des cavités de toutes dimensions. L'eau, en se retirant dans ces cavités, a incrusté, des différentes matières qu'elle tenait en solution, les longues fissures par lesquelles elle y pénétrait, et a donné ainsi naissance aux *filons métallifères*.

Telle est, d'après Werner, l'origine de tous les terrains qui composent l'écorce du globe, à part toutefois les alluvions, la terre végétale et les produits du feu volcanique, qu'il attribuait à des incendies souterrains de couches de combustibles charbonneux. Il explique la liaison intime qui unit incontestablement les terrains primitifs aux terrains secondaires, aussi bien dans leur nature mi-

[1] Leibnitz avait déjà cherché à expliquer la mise à sec des continents par la retraite de l'eau dans les vastes cavités intérieures qu'il attribuait à d'anciennes boursouflures produites lors de la fusion primitive.

néralogique que dans leur association, en supposant que la composition de l'Océan, et, par suite, la nature de ses dépôts, ont varié depuis l'époque où le granit s'en précipitait, tantôt graduellement, tantôt d'une manière subite[1].

En résumé, dans le système de Werner, tous les terrains ont été produits dès l'origine tels que nous les voyons aujourd'hui. L'activité interne du globe est complétement méconnue, aussi bien dans la formation des roches cristallines et des dépôts métallifères que comme cause des dislocations subies par les terrains stratifiés de tous les âges.

CHAPITRE II.

SYSTÈME DE HUTTON.

James Hutton et son système, ou école écossaise.

Pendant que l'enseignement de Werner commençait à captiver l'attention générale et à exciter l'enthousiasme de ses élèves, grâce aux charmes de la parole du maître et à la puissance de méthode avec laquelle les faits alors connus s'y trouvaient coordonnés, une autre doctrine bien différente prenait naissance en Écosse. Doué d'un génie d'observation non moins éminent que le professeur de Freyberg, James Hutton arrivait à des conclusions opposées sur des phénomènes fondamentaux, et ces deux écoles antagonistes s'établissaient simultanément.

Dès 1785, Hutton publiait son système de la Théorie de la terre[2]. Dix années plus tard, après avoir fait en Écosse plusieurs

[1] Quand la dissolution recouvrait tout le globe et qu'elle avait une grande profondeur, elle était tranquille et pure. Aussi les premières roches sont exclusivement cristallines. Plus tard, quand le niveau de la mer eut baissé et que la terre ferme eut apparu au-dessus de son niveau, les courants exercèrent une action plus forte et détruisirent une partie des masses préexistantes. D'autre part, les agents atmosphériques attaquèrent les roches émergées. C'est ainsi que des dépôts mécaniques se formèrent et devinrent même abondants.

[2] *Theory of the earth or an investigation of the laws observable in the composition, dissolution and restoration of land upon the globe.* By James Hutton, M. D. et F. R. S. Ed. and member of the Royal Academy of agriculture at Paris. Lu, le 7 mars et le 4 avril 1785, à la Société royale d'Édimbourg, 96 pages in-4°. La seconde édition

voyages pour recueillir des observations nouvelles, il développa ses idées dans un ouvrage plus volumineux, portant le même titre. Mais, ce qui contribua surtout à faire connaître la doctrine de Hutton, ce fut l'ouvrage de John Playfair[1], son disciple et son ami, à la fois mathématicien, géologue et écrivain distingué. Son talent d'exposition et l'élégance de son style soutinrent vigoureusement les nouvelles idées, aussi bien contre les violentes attaques d'un petit nombre qui consentait à les prendre au sérieux, que contre la dédaigneuse indifférence de la majorité qui les regardait comme non avenues.

L'importance des ouvrages de Hutton et de Playfair, dans lesquels se trouvent pour la première fois établis et développés les fondements de la géologie moderne, et en particulier ceux du métamorphisme, oblige à en résumer ici, comme je l'ai fait pour Werner, les principales propositions. C'est, d'ailleurs, le seul moyen de bien faire la part de l'auteur de ces découvertes fondamentales et celle de ses continuateurs. Nous suivrons l'ordre même adopté par Hutton et son commentateur.

1° Certains terrains qualifiés de primitifs ont été formés à la manière des terrains sédimentaires récents.

L'auteur remarque d'abord que certains terrains qualifiés de primitifs paraissent avoir été formés à la manière des terrains sédimentaires récents. C'est ainsi que des couches des Alpes, considérées comme primitives, ne peuvent être antérieures à l'existence des végétaux, puisqu'elles en renferment de nombreux débris sous forme de combustible minéral. Ailleurs, d'autres terrains cristallins renferment des couches qui contiennent du sable et des galets : elles ont donc été formées par des débris de terrains préexistants ; car, si l'on voulait admettre, avec Deluc,

de l'ouvrage est intitulée : *Theory of the earth, with proofs and illustrations, in four parts.* Édimbourg, 2 vol. in-8°, 1795. D'un autre côté, Werner publie son Traité des caractères des minéraux, en 1774, à l'âge de vingt-quatre ans. Bientôt après, vers 1780, il commence à développer dans ses leçons les principes de la Géognosie. Sa Classification des terrains date de 1787.

[1] Playfair, *Explication on the Huttonian theory.* 1802. Traduit en français par Basset. Paris, 1815.

que le sable quartzeux est un dépôt chimique, on ne comprendrait pas pourquoi il n'en existe pas au milieu des masses les plus cristallines, notamment dans le granit et les filons métallifères.

2° Consolidation et cristallisation de roches stratifiées par l'influence de la chaleur.

La compacité actuelle de ces roches, à la fois sédimentaires et de structure cristalline, ne peut résulter que de l'action de la chaleur et d'un ramollissement. D'après Hutton, si une substance étrangère avait pénétré, à l'état de dissolution, dans les pores de la roche, le liquide y aurait certainement laissé certains vides. Les masses de calcaire lamellaire, souvent subordonnées à cette espèce de roches cristallines, lui servent aussi d'argument. Car *il ne met pas en doute* que le calcaire, où Black venait de découvrir l'acide carbonique, ne puisse retenir son élément gazeux à une chaleur élevée, si cette roche est en même temps soumise à une forte pression. Il ajoute que, dans ces conditions, le carbonate de chaux peut même être fondu. On sait comment cette prévision hardie fut confirmée plus tard par les expériences de son plus célèbre disciple[1].

Transformation des combustibles minéraux dans ces mêmes conditions.

Le gisement des diverses espèces de combustibles minéraux fournit encore des points d'appui à cette même idée théorique. Après avoir remarqué que, dans l'île de Sky, le lignite ordinaire se change, sous le basalte qui le traverse, en un combustible compacte, à cassure brillante, semblable à la houille, Hutton conclut que la houille a la même origine que le lignite, comme, d'ailleurs, Buffon l'avait déjà supposé; que les couches de houille et les dépôts de bitume résultent de la transformation de matières végétales et animales par la chaleur et sous l'influence de la pression. En généralisant cette idée, il en vint à comprendre même le graphite dans cette série de produits dérivés de l'enfouissement et de la transformation des êtres organisés[2].

Ainsi, par une pensée toute nouvelle, l'illustre géologue écos-

[1] Sir James Hall, dont les conclusions sur l'action simultanée de la chaleur et de la pression seront signalées plus loin.

[2] N° 121, p. 206, de la traduction française.

sais faisait coopérer successivement l'eau et la chaleur interne du globe dans la formation des mêmes roches.

3° La chaleur interne a en outre opéré le redressement des couches.

C'est le trait du génie de rapprocher dans une même origine des phénomènes très-dissemblables. La chaleur souterraine n'a pas seulement consolidé et minéralisé les couches au fond de la mer. Hutton reconnut qu'elle a, en outre, soulevé et redressé des couches qui étaient primitivement horizontales. Saussure venait alors d'observer le redressement des célèbres poudingues de Valorsine[1], mais sans se prononcer sur la cause du phénomène.

4° Origine éruptive du granit et d'autres roches.

Une autre découverte, due à Hutton, a eu aussi une influence capitale sur la géologie : je veux parler de l'origine éruptive du granit. En étudiant cette roche dans les montagnes de son pays, notamment à Portsoy et dans le Glen-Tilt, il reconnut qu'elle forme, dans les masses encaissantes, des veines qui témoignent de son injection à l'état fluide; que sa nature minéralogique annonce, d'ailleurs, l'action de la chaleur. Il est, toutefois, juste d'ajouter qu'un compatriote de Hutton, Strange, venait d'arriver à la même conclusion[2].

Les roches connues en anglais sous le nom de *trapp*, *toadstone* ou de *whinstone* ont aussi été injectées dans des régions où il n'y a pas d'indices de volcans[3]. Hutton le démontre par de nombreux exemples qu'il observa en Écosse, contrée éminemment favorable à ce genre d'études. Il recherche, en outre, la cause de la différence que présentent ces *laves souterraines* comparées à celles que rejettent les volcans, où l'on ne trouve ni zéolithe, ni spath calcaire. C'est encore la chaleur sous pression qui lui paraît expliquer cette différence[4].

[1] Les observations de Stenon sur le même sujet, que M. Élie de Beaumont a mises en lumière (*Annales des sciences naturelles*, t. XXV, p. 237), paraissaient alors tombées tout à fait dans l'oubli.

[2] *Transactions*, t. LXV, 1775, p. 5.

[3] Il faut aussi rappeler que Desmarets avait déjà démontré depuis longtemps l'origine ignée des basaltes de l'Auvergne, de l'Italie et de la côte septentrionale de l'Irlande (1768-1771).

[4] A propos de l'erreur, d'ailleurs très-concevable, que commettait alors Hutton

5° Filons métallifères remplis de bas en haut.

Pour l'auteur de ces déductions fondamentales les filons métallifères ne peuvent être que des injections de masses fondues, comme Descartes l'avait pressenti.

Résumé du système de Hutton.

En résumé, Hutton explique l'histoire du globe avec autant de simplicité que de grandeur. L'atmosphère est la région où les roches se décomposent; puis leurs débris vont s'accumuler dans le fond de la mer. C'est dans ce grand laboratoire que les matières meubles sont ensuite minéralisées et transformées, sous la double action de la pression de l'Océan et de la chaleur, en roches cristallines, ayant l'aspect des roches anciennes, lesquelles sont soulevées plus tard par l'action de cette même chaleur interne, et démolies à leur tour. La dégradation d'une partie du globe sert donc constamment à la reconstruction d'autres parties, et l'absorption continue des dépôts inférieurs produit sans cesse de nouvelles roches fondues, qui peuvent être injectées à travers les sédiments. C'est un système de destruction et de renouvellement dont on ne peut pressentir ni le commencement ni la fin. Comme dans les mouvements planétaires, où les perturbations se corrigent elles-mêmes, on voit des changements continuels, mais renfermés dans certaines limites, de telle sorte que le globe ne porte aucun caractère d'enfance ni de vieillesse[1].

Ainsi Hutton est bien le fondateur du principe fécond de la transformation des roches sédimentaires sous l'action de la chaleur.

Toutefois nous reconnaîtrons plus loin qu'il y a beaucoup de

sur l'origine de ces amandes calcaires, je ne puis m'empêcher de remarquer avec quelle pénétration un autre grand observateur de la nature, Spallanzani, reconnaissait, dès cette époque, l'origine mixte des roches amygdaloïdes des collines Euganéennes. La disposition des boursouflures de ces roches lui apprenait que la roche avait coulé, en même temps que le carbonate de chaux lui paraissait résulter d'infiltrations.

[1] En considérant cette action comme un phénomène continu, Hutton a obscurci sa belle conception, mais il a rendu un immense service, en montrant que les agents naturels qui fonctionnent sous nos yeux doivent servir de guide dans l'histoire du globe, et qu'il ne faut recourir qu'aux lois de la nature; tandis que tous les autres systèmes supposaient des événements sans aucune analogie avec ce qui se passe aujourd'hui.

réserves à faire sur des conclusions aussi absolues[1]. Comme la plupart des hommes de génie qui ont ouvert de nouvelles voies, Hutton a en effet exagéré la portée des idées qu'il avait conçues. On ne peut, toutefois, songer sans admiration avec quelle profonde pénétration et quelle rigueur d'induction cet homme si clairvoyant, à une époque où les observations précises étaient encore bien peu nombreuses, admettant le premier le concours simultané de l'eau et de la chaleur[2] dans la formation des terrains, imaginait un système qui embrasse toute l'histoire physique du globe. Il a posé des principes qui sont aujourd'hui universellement admis, au moins dans ce qu'ils ont de fondamental[3].

CHAPITRE III.

SUCCESSEURS DE HUTTON.

Idées d'Arduino sur les dolomies du Vicentin, 1779.

Avant même l'apparition de la doctrine de Hutton, un observateur italien faisait connaître un fait d'où il déduisait que les actions ignées récentes peuvent transformer les roches sédimentaires, même les plus modernes.

Dès 1779, Arduino[4] exprima clairement l'idée que les dolo-

[1] La pyrite de fer, si abondamment disséminée dans les terrains stratifiés, lui paraissait, comme tous les minéraux des filons, produite par voie sèche, et lui servait de témoin de l'action de la chaleur que les terrains ont subie. Il étendait cette observation aux silex de la craie, dont la solidité contraste tant avec l'état physique de la silice connue dans les laboratoires.

[2] Dans les cosmologies de Leibnitz et de Buffon, le feu central n'est supposé avoir agi que dans l'origine du globe, avant la formation des terrains. D'ailleurs, combattant certaines idées qui avaient cours alors, Hutton observe que la chaleur interne du globe peut exister sans qu'il y ait inflammation ou combustion intérieure.

[3] Hutton, né en 1726, a fait des observations dans les sites les plus sauvages de l'Écosse, et médité pendant plus de quarante ans avant de publier sa première esquisse. La vue des filons de granit de la vallée du Glen-Tilt fut pour lui un trait de lumière. Beaucoup des faits sur lesquels il s'appuie ont été pour la première fois reconnus par lui.

[4] *Osservazioni chimiche sopra alcuni fossili.* Venezia, 1779. M. Pasini a signalé ce travail dans le Bulletin de la Société géologique de France, t. III, p. c.

« Je me figure, dit Arduino, que la magnésie n'est que de la chaux douée de pro-

mies de Lavina, dans le Vicentin, ont été formées aux dépens du calcaire secondaire. La nature bréchiforme de la roche lui faisait penser que le calcaire avait été brisé, et que l'agent modificateur et igné était ensuite arrivé de la profondeur à travers les fissures.

Observations de Thomson sur les calcaires de la Somma, 1798.

D'un autre côté, vingt années plus tard, un géologue anglais, le docteur G. Thomson[1], après avoir examiné les blocs de calcaire cristallin de la Somma, si riches en minéraux variés, était amené à les considérer comme du calcaire de l'Apennin qui aurait été modifié par la chaleur, et se demandait si le marbre de Carrare n'avait pas la même origine.

Expériences de sir James Hall sur la cristallisation du calcaire, sous l'influence combinée de la chaleur et de la pression, 1805.

Mais, ce qui contribua alors le plus puissamment à appuyer le principe nouvellement établi de la transformation des roches, ce fut la série d'expériences de sir James Hall[2]. Elles lui furent suggérées, comme il le déclare, dès 1790, par Hutton. C'est, à proprement parler, la première fois que l'on a cherché sérieusement à établir la synthèse expérimentale dans l'étude des phénomènes géologiques, en y introduisant autre chose que l'observation des faits, tels que la nature nous les présente, et l'analyse chimique.

Hall était encouragé dans sa recherche par la présence fré-

priétés particulières, par suite d'une action ignée souterraine... Je ne l'ai trouvée que dans les grandes déchirures des couches calcaires de nos montagnes. » Il est extrêmement remarquable que cette assertion neuve et hardie prit naissance l'année même où la magnésie était reconnue comme une terre distincte de la chaux par les expériences de Retzius et de Bergmann. Ce n'est que onze ans plus tard, en 1791, que Dolomieu fixa l'attention sur une espèce particulière de calcaire magnésien qu'il avait remarquée dans le Tyrol méridional. (Sur un genre de pierres très-peu effervescentes avec les acides, etc. *Journal de Physique*, t. XXXIX, p. 3.) L'année suivante, Théodore de Saussure publia l'analyse de cette roche, et lui donna le nom de *dolomie* qu'elle a conservé depuis lors. (*Journal de Physique*, t. XL, p. 161.)

[1] Sur la nature des marbres vomis par le Vésuve, et sur l'étendue possible des influences volcaniques. (*Bibliothèque britannique*, t. VII, p. 40, 1798.) Breislack adopta et défendit cette opinion.

[2] *Account of a series of experiments shewing the effects of compression in modifying the action of the heat.* Lu le 3 juin 1805. (*Edimb. Phil. Trans.* t. VI, 1812.)

quente dans les trapps de nodules de calcaire cristallin. Il constata que, sous une certaine pression, le carbonate de chaux peut, à une forte chaleur, retenir son acide carbonique, et que l'effet combiné de la chaleur et de la pression est d'agglutiner cette substance en une masse solide, quelquefois cristalline. Il reconnut aussi que le bois, soumis aux mêmes conditions, se change en une sorte de lignite. Quoiqu'il ne s'agît que de la démonstration d'un fait en apparence bien simple, Hall ne consacra pas moins de trois ans à ses expériences, qui furent au nombre de plus de cent cinquante. Cela donne une idée des difficultés en présence desquelles on se trouve, dès qu'on opère à chaud avec de fortes tensions[1].

Travaux de Macculoch, 1819.

Nulle contrée ne présente peut-être de plus beaux et de plus nombreux exemples de l'intercalation de roches éruptives que certaines régions de l'Écosse. C'est naturellement sur un sol accidenté de cette manière que devaient germer les premières notions précises relatives à ce genre de phénomène. Aussi, les importants mémoires que publia Macculoch[2] sur cette contrée, devenue désormais classique, fournirent de nouveaux arguments à l'appui de la théorie que le même pays avait inspirée à Hutton.

Long espace de temps pendant lequel les idées de Hutton restent à peu près inaperçues.

On peut être surpris que des idées profondément justes pour la plupart, et déjà appuyées sur beaucoup d'observations précises, soient restées longtemps pour ainsi dire inaperçues sur le continent. A Édimbourg même, un disciple ardent de Werner, Jameson, venait combattre les doctrines que l'on peut appeler écossaises, avec des arguments qu'il rapportait en ligne droite de l'école de Freyberg. En France, Dolomieu, Giraud-Soulavie, Faujas-Saint-Fond, qui, depuis la fin du siècle dernier, battaient en brèche l'hypothèse de Werner sur l'origine aqueuse des basaltes, et d'Aubuisson, que l'étude de l'Auvergne obligea un peu

[1] Bucholz a annoncé que l'on peut obtenir du carbonate de chaux cristallin, même par une calcination sous la pression ordinaire.

[2] *Description of the western islands of Scotland*, 1819; 3 vol. D'après Macculoch, les schistes amphiboliques paraissent résulter de la transformation d'argiles.

plus tard à adopter l'opinion opposée à celle de son maître, n'accordèrent que peu d'attention à des idées vers lesquelles ils auraient dû, il semble, se sentir vivement attirés. Cuvier, dans le Rapport sur le progrès des sciences naturelles depuis 1789, qu'il publia en 1808, ne cite Hutton que pour signaler avec beaucoup de doute l'opinion de ce savant sur l'origine du basalte[1]. Comment, ajoute d'ailleurs Cuvier, résoudre les problèmes de l'histoire du globe avec les forces que nous connaissons maintenant à la nature[2]?

Leur propagation ne commence guère qu'au rétablissement de la paix, en 1815.

Ce n'est réellement qu'à partir de 1815, après que les relations de la Grande-Bretagne furent renouées avec le continent, que les travaux de Hutton et de ses disciples commencèrent à être connus dans le reste de l'Europe. Alors seulement parut la traduction française[3] de l'ouvrage de Playfair, qui avait été publié, treize ans auparavant, à Édimbourg.

Traduction française de Playfair, 1815.

M. Boué et M. Necker lui servent d'interprètes, de 1818 à 1822.

Peu d'années après, le docteur Boué, qui avait étudié la géologie dans cette capitale, et exploré l'Écosse, contribua aussi à propager les mêmes idées[4]. En outre, se fondant sur les modifications observées dans le voisinage des roches plutoniques dans

[1] Édition in-8°, p. 172.

[2] Rapport précité, p. 180. Cette dernière phrase fait la critique de cet autre principe que Hutton avait cherché à établir, que les phénomènes anciens paraissent dus à l'action suffisamment prolongée des causes actuelles. « Cette progression est trop lente pour être aperçue immédiatement par l'homme; sa partie la plus éloignée que l'expérience puisse fournir doit être considérée comme l'*incrément* momentané d'une immense progression qui n'a d'autres limites que la durée du monde. Le temps se charge de la fonction d'intégrer les parties dont se compose cette progression. » (Playfair, ouvrage cité.) Dolomieu était tout à fait opposé à cette manière de voir. « Ce n'est pas le temps que j'invoquerai, c'est la force. La nature demande au temps les moyens de réparer les désordres, mais elle reçoit du mouvement la puissance de bouleverser. » (*Journal de Physique*, t. II, 1792.)

[3] *Explication de Playfair sur la Théorie de la terre par Hutton*, traduit par Basset: Paris, 1815.

[4] Tableau de l'Allemagne (*Journal de Physique*, 1822). Mémoire géologique sur le sud-ouest de la France (*Annales des sciences naturelles*, t. II, 1824). M. Boué chercha à montrer l'origine éruptive du granit, du porphyre et du grünstein, dans diverses régions de l'Allemagne et de la France. Il appuya sa conclusion principale

l'île de Sky, à Monzoni et ailleurs, il émit l'idée que le gneiss et les autres roches schisteuses cristallines qui avoisinent le granit ne sont que des terrains sédimentaires modifiés par d'anciennes éruptions de cette roche. C'était sans doute exagérer beaucoup l'étendue d'action du phénomène; cependant certains géologues ont conservé cette manière de voir jusque dans ces derniers temps[1]. Après avoir visité l'Écosse, M. Necker servit également d'interprète aux principales vues de Hutton[2].

Sir Lyell contribue puissamment à propager les idées de Hutton.

De son côté, sir Charles Lyell fit connaître de toutes parts la doctrine écossaise par des ouvrages élégamment écrits. Dès 1825, il résuma par le nom de *métamorphisme* les changements qu'ont éprouvés, selon la théorie de Hutton, les terrains d'origine sédimentaire sous l'action de la chaleur centrale; c'est cette dénomination qui a été généralement adoptée[3].

Hypothèse de Léopold de Buch sur l'origine des dolomies du Tyrol, 1822.

Mais, ce qui excita au plus haut degré l'attention à cette époque, ce fut le travail que Léopold de Buch publia, en 1822, sur la géologie du Tyrol méridional[4]. Déjà, dans le siècle dernier, comme nous l'avons dit précédemment, Arduino avait attribué la dolomie du Vicentin à une transformation du calcaire. Vingt-sept années plus tard, Heim, géologue allemand, dont les ouvrages renferment une foule de faits alors neufs et judicieusement observés, fit, en Thuringe, des observations qui l'amenèrent aux mêmes conclusions[5].

sur les excellentes observations de Palassou dans les Pyrénées. Les gîtes de fer des environs de Vicdessos lui paraissent être des produits de sublimation.

[1] Ainsi, d'après Léopold de Buch, tout le gneiss de la Finlande ne serait que le résultat de la transformation de schistes argileux sous l'action de substances qui se seraient dégagées lors du soulèvement du granit; c'est, ajoute-t-il, l'idée adoptée par tous les géologues. (*Ueber Granite und Gneiss. Abhandlungen der Academie des Wissenschaften zu Berlin*, p. 63, 1842.)

[2] *Voyage en Écosse et aux îles Hébrides*, 1821.

[3] Les roches métamorphiques forment une partie de ses roches hypogènes.

[4] Lettres sur la géologie du Tyrol méridional, *Annales de chimie et de physique*, t. XXIII, 1822. *Taschenbuch*, 1824, t. XIX et XX.

[5] En parlant des dolomies caverneuses du zechstein, il dit qu'on en trouve de semblables dans le terrain du muschelkalk; que ce n'est qu'une manière d'être du

Léopold de Buch présenta de nouveau cette hypothèse d'une manière saisissante, en lui donnant une plus grande portée. Pour lui, les masses colossales et déchirées de dolomie de la vallée de Fassa ne sont autres que des calcaires, dans les innombrables fissures desquels les éruptions de mélaphyre qui les ont soulevés et brisés ont introduit la magnésie à l'état de vapeur. Il amenait ainsi à cette conclusion, que ce n'est pas la chaleur seule qui peut avoir transformé les roches, mais que des émanations chimiques doivent y avoir aussi contribué [1]. C'était, en outre, agrandir l'importance des dislocations mécaniques, en montrant comment elles peuvent donner naissance à des sources de sublimations ou de vapeurs qui réagissent ultérieurement sur les roches. C'était en un mot un nouveau point de vue ouvert dans la science par celui qui déjà alors était à la tête des géologues.

Discussions profitables pour la science qui sont résultées de cette hypothèse.

Des travaux ultérieurs ont montré qu'il faut apporter certaines modifications à cette conclusion; mais les discussions qu'a soulevées l'hypothèse hardie du métamorphisme des dolomies ont certainement provoqué des recherches qui ont enrichi la science. Une idée qui conduit à des découvertes repose en général sur quelque rapport profond et dénote un esprit inventif.

Les Alpes, qui seront à jamais une région classique pour la géologie, tant à cause des actions qui ont donné naissance à cette chaîne que par les profondes et importantes déchirures dans

calcaire; à cette époque on ignorait encore la présence de la magnésie dans cette roche. Cette modification du calcaire, ajoute-t-il, est en relation avec des dérangements (*störungen*) qui ont été produits de bas en haut; et, parmi les forces naturelles, il n'y a que les vapeurs qui puissent avoir produit cette action; elles ont en même temps formé le gypse, qui est toujours associé à la dolomie. (Heim, *Geologische Beschreibung des Thüringerwaldgebirgs*, 1806. Theil II, Abth. 5, p. 99 à 121.)

[1] Toutefois, postérieurement Breislack avait reconnu, dans son excellente description de la Solfatare de Pouzzoles, que les vapeurs transforment les roches. M. Cordier avait montré, dès 1820, que l'alunite résulte en général de l'attaque des roches feldspathiques par des vapeurs sulfureuses (*Annales des mines*, 1re série, t. V, p. 303.)

lesquelles elle expose sa constitution interne, ont fourni, avec l'Écosse, les observations fondamentales pour la théorie du métamorphisme.

Observations de Brochant sur les Alpes de la Tarantaise 1808-1819.

Déjà, dans un Mémoire qui fait époque dans la science, et qui parut au moment même où Cuvier et Brongniart publiaient l'Essai de la géographie minéralogique des environs de Paris, Brochant[1] avait signalé, de la manière la plus précise, dans les Alpes de la Tarantaise, des passages des roches sédimentaires à des roches cristallines alors réputées primitives. Il avait même eu plus tard le bonheur de découvrir des fossiles dans ces dernières. Appliquant à ces roches cristallines à peu près les mêmes arguments dont s'était servi Hutton, il concluait que les calcaires grenus, micacés, talqueux, les schistes micacés, talqueux et amphiboliques de cette région des Alpes sont d'origine sédimentaire, et il les rapportait aux terrains de transition, à cause de leur analogie avec ceux de l'Allemagne. Il allait jusqu'à rapprocher dans un même groupe les roches granitoïdes du Mont-Blanc et les roches talqueuses et feldspathiques auxquelles elles sont associées, et croyait pouvoir établir l'âge relativement récent de ces prétendus granits alpins. Sans adopter le principe de la transformation des roches, il contribuait cependant, peut-être à son insu, et avec une clarté et une rigueur de déduction remarquables, au développement de ces idées nouvelles[2].

M. Studer découvre des terrains secondaires associés aux roches cristallines, 1827.

Une excursion dans les Alpes de Glaris, que M. Studer fit en 1826, avec M. Mérian, révéla pour la première fois un passage des terrains secondaires (flysch) à des roches aussi cristallines

[1] Observations géologiques sur les terrains de transition qui se rencontrent dans la Tarantaise et autres parties de la chaîne des Alpes. (*Journal des mines*, t. XXIII, p. 321 à 383, 1808.) Considérations sur la place que doivent occuper les roches granitoïdes du Mont-Blanc dans l'ordre d'antériorité des roches primitives. (*Annales des mines*, 1re série, t. IV, 1816.) Découverte de fossiles organiques dans les roches cristallines. (*Id. ibid.* t. IV, 1819.)

[2] L'attention fut de nouveau portée sur les terrains qui composent la chaîne des Alpes par un ouvrage de Backewell : *Travels in the alpine parts of Switzerland and Savoy*, 1822.

que le micaschiste et le gneiss du Saint-Gothard et de Chamouny[1]. Comme le disait M. Élie de Beaumont[2], dans une lettre écrite douze ans plus tard, après avoir visité les mêmes localités, on avait sous les yeux l'un des faits de métamorphisme les plus évidents des Alpes, et en même temps l'un de ceux qui prouvent le mieux que ces phénomènes ne sont pas exclusivement restreints aux terrains les plus anciens.

M. Élie de Beaumont rapporte tout un groupe de roches des Alpes, en partie cristallines, au terrain jurassique, 1828.

Telle est, d'ailleurs, la conclusion importante à laquelle arrivait, de son côté, M. Élie de Beaumont lui-même, à peu près en même temps que M. Studer, dans une exploration approfondie des Alpes du Dauphiné et de la Savoie, qui a été d'une fécondité inappréciable pour la géologie. Il avait reconnu, dans le graphite du col du Chardonnet, qui est associé à des roches feldspathiques, un résultat de la transformation de l'anthracite[3]; et, à la suite d'un examen attentif, il proposait de faire remonter l'âge d'une partie de ces roches cristallines jusque dans le terrain jurassique.

Ainsi ce prestige d'antiquité des roches des Alpes, ébranlé déjà par Brochant et par Léopold de Buch, se trouvait à jamais rompu; en même temps M. Élie de Beaumont faisait connaître combien est récent le relief de la plus grande chaîne de montagnes de l'Europe. Des résultats à la fois si nouveaux et si grandioses frappèrent vivement tous les esprits et donnèrent une impulsion extraordinaire aux études géologiques.

Chargé, à cette même époque (1829), du cours de géologie de l'École des mines, M. Élie de Beaumont contribua dès lors puissamment à propager les doctrines géologiques auxquelles il avait apporté un si large tribut, surtout à l'aide de faits observés par lui-même dans les Alpes, ou empruntés aux Mémoires de Mac-

[1] *Zeitschrift von Leonhard*, t. XXV, p. 1, 1827.

[2] Lettre de M. Élie de Beaumont à M. Studer, citée dans le *Leonhards Jahrbuch*, 1840, p. 352.

[3] Sur un gisement de végétaux fossiles et de graphite situé au col du Chardonnet, département des Hautes-Alpes. (*Annales des sciences naturelles*, t. XV, 1828.)

culoch sur l'Écosse. La comparaison par laquelle il résumait les passages graduels des roches sédimentaires aux roches cristallines, en l'assimilant « à la structure physique d'un tison à moitié charbonné, dans lequel on peut suivre les traces des fibres ligneuses bien au delà des points qui présentent encore les caractères naturels du bois, » est aussi claire que profonde[1]. Il montrait, d'ailleurs, que des calcaires et d'autres roches peuvent avoir cristallisé sans qu'il y ait eu fusion, comme il arrive dans une barre de fer long-temps chauffée au-dessous de son point de ramollissement[2].

Quand, peu d'années plus tard, M. Élie de Beaumont découvrait, dans le massif de l'Oisans[3], des roches granitiques débordant au-dessus du calcaire jurassique, qui est devenu saccharoïde, et au contact duquel elles ont produit de petits filons de minéraux métalliques, tout en se modelant exactement sur les contours ondulés de leur surface, il agrandissait encore le champ des phénomènes métamorphiques.

Observations analogues faites dans les montagnes de Carrare.

Des faits tout à fait semblables à ceux qui venaient d'être découverts dans les Alpes furent constatés dans la région des Apennins. Le marbre de Carrare et le massif de schistes talqueux et micacés qui l'accompagnent furent classés dans les terrains secondaires, jurassiques ou crétacés, par les observations de MM. Pasini, Pareto, Guidoni, Paul Savi[4], qui furent confirmées par Hoffmann[5] et Pilla. La Toscane fournit, d'ailleurs, dès 1829, à M. Savi beaucoup d'exemples très-remarquables d'altérations variées dans le voisinage des serpentines.

Roches cristallines développées près des massifs granitiques des Pyrénées.

Les Pyrénées révélèrent aussi, à la même époque, des faits qui confirmèrent et étendirent les nouvelles idées.

Déjà, en 1819, un observateur aussi judicieux que modeste,

[1] *Annales des sciences naturelles*, t. XV, p. 362-372.

[2] *Annales des mines*, 3e série, t. V, p. 61.

[3] Faits pour servir à l'histoire des montagnes de l'Oisans. (*Id. ibid.* p. 1.)

[4] Les travaux de ces géologues ont été résumés par M. Boué, dans le Bulletin de la Société géologique, t. III, p. 52, 1832. Ils vont de 1829 à 1831.

[5] *Entdeckungen über den Marmor von Carrara.* (*Jahrbuch*, 1833, p. 102.) *Gebirgsverhältnisse der Grafschaft Carrara* (*Ibid.* 1834, p. 563; *Karstens Archiv.* t. VI,

Observations de Palassou dès 1819, et de M. Dufrénoy, en 1830.

Palassou, après avoir exploré pendant quarante ans ces montagnes, avait annoncé avec certitude qu'il n'existe pas de calcaires primitifs dans cette chaîne, et que des calcaires aussi cristallins que le marbre de Paros alternent avec des couches à fossiles et en renferment quelquefois eux-mêmes[1].

M. Dufrénoy fit voir que ces transformations sont dues à l'intercalation de massifs granitiques, qu'elles ont eu lieu dans toute l'étendue de la chaîne, et qu'elles ont affecté des terrains d'âge varié, jusques et y compris la craie[2]. Il montra plus tard que des amas de minerai de fer ont aussi été produits postérieurement au terrain de craie, dans le voisinage du granit, et comme par une conséquence du soulèvement de cette chaîne[3]. Ainsi, la formation de roches métamorphiques et de gîtes métallifères attestait la puissance d'action du granit. En outre, M. Dufrénoy trouva aussi dans le terrain crétacé des effets d'altération particuliers dus au voisinage des ophites[4].

Observations de M. Keilhau, en 1826, et de M. le Dr Jackson, en 1827.

Parmi les premiers observateurs de phénomènes métamorphiques, il convient encore de mentionner M. Keilhau, qui, en 1826, reconnaissait aux environs de Christiania que le terrain de transition est généralement modifié autour du granit[5], et M. le docteur

p. 229.) Nous croyons, à cette occasion, devoir rappeler que M. de Blainville avait déjà distingué alors, dans des échantillons polis de cette dernière roche, des vestiges non équivoques de polypiers.

[1] *Mémoire sur les pierres calcaires des Pyrénées.* (Suite des Mémoires de Palassou; Pau, 1819.)

[2] Notamment aux environs de Saint-Martin-de-Fenouillet. Caractère de la craie dans le sud de la France. (*Annales des mines*, 2e série, t. VIII, p. 321, 1830.)

[3] Mémoire sur la position géologique des principales mines de fer de la partie orientale des Pyrénées, accompagné de considérations sur l'époque du soulèvement du Canigou et sur la nature du calcaire de Rancié. (*Id.* 3e série, t. V, p. 307, 1834.)

[4] Mémoire sur la relation des ophites, des gypses et des sources salées des Pyrénées. (*Id. ibid.* t. II, p. 21, 1832.)

[5] Il admet pour cause de ces changements, qui se sont parfois étendus jusqu'à 1,200 mètres, de simples actions moléculaires, sans intervention de la chaleur ni d'émanations profondes. Il pense que les roches éruptives ne sont autres que des

Ch. Jackson, qui annonçait, en 1827, que des roches amygdaloïdes ont été produites par l'action des roches trappéennes sur les grès de la Nouvelle-Écosse.

CHAPITRE IV.

TRAVAUX RELATIFS AUX AUTRES ACTIONS QUE L'INTÉRIEUR DU GLOBE FAIT SUBIR À SON REVÊTEMENT EXTERNE ET QUI SE RATTACHENT AU MÉTAMORPHISME.

Divers effets de l'activité interne du globe qui ont éclairé les effets du métamorphisme.

Outre les effets de transformation dont nous venons de parler, il est d'autres phénomènes de nature variée qui paraissent aussi résulter des actions que l'intérieur de notre planète a exercées dans les anciennes époques, ou exerce encore aujourd'hui sur son revêtement externe; tels sont les volcans, les éruptions de roches anciennes, les dépôts métallifères et les dislocations mécaniques auxquelles les chaînes de montagnes doivent leur naissance. Ces divers effets chimiques, physiques ou mécaniques de l'activité interne du globe sont très-probablement solidaires, et ce serait laisser subsister une lacune que de ne pas rappeler brièvement dans cet historique les travaux qui ont indirectement contribué à éclairer les effets du métamorphisme.

§ I.

ÉRUPTIONS DES VOLCANS.

Éruptions volcaniques. Dolomieu montre que leur siége est au-dessous du granit, 1798.

Les volcans éteints de la France centrale, dont Guettard avait reconnu, dès 1751, l'identité avec les volcans actifs[1], révélaient plus tard à Dolomieu un fait capital : c'est que les phénomènes volcaniques ont leur siége sous le granit, et les autres terrains primordiaux, c'est-à-dire au-dessous de l'*écorce consolidée* du globe[2]. Cette idée, avec laquelle nous sommes aujourd'hui si

roches sédimentaires situées à une plus grande profondeur et devenues liquides. (*Darstellung der Uebergangsformation in Norwegen*, 1826. *Ueber die Bildung des Granits. Karstens Archiv.* t. X, 1837. *Gœa Norvegica*, t. I, 1830.)

[1] Mémoire sur quelques montagnes de la France qui ont été des volcans. (*Mémoires de l'Académie*, 1752.)

[2] « 1° Les produits volcaniques appartiennent *ici* (en Auvergne) à un amas de

familiarisés, paraissait neuve à une époque à laquelle les éruptions des volcans étaient généralement considérées comme des accidents isolés, superficiels et insignifiants. En effet, l'expérience de Lémery sur la combustion spontanée d'un mélange chauffé de soufre et de fer[1], ou la supposition, sanctionnée par l'autorité à peu près souveraine de Werner, d'incendies souterrains de combustibles charbonneux, portait alors à tout expliquer par l'action de foyers locaux. Buffon lui-même, le plus ardent promoteur de la chaleur primitive du globe, ne considérait pas autrement les volcans. Ainsi, la grande idée de Descartes qui liait déjà ces phénomènes à la formation des sources thermales et des filons métallifères, et même aux anciens brisements de l'écorce terrestre, était tombée dans un oubli que l'on concevra difficilement. Et c'est en revenant à cette idée par la force des faits, plus encore que par ses observations précises sur la composition des roches, que Dolomieu contribua pour beaucoup à l'essor que la géologie prit alors en France.

Les expériences de Spallanzani apprennent que la lave apporte une haute température des profondeurs.

Mais l'esprit humain ne s'affranchit, en général, d'idées erronées que par des efforts longs et successifs. On croyait alors, et Dolomieu cherchait à l'expliquer par des hypothèses mal fondées, que les laves, au lieu d'apporter leur chaleur des foyers souterrains, l'acquièrent par une sorte de combustion intérieure qu'elles subissent en arrivant dans l'atmosphère; que d'ailleurs elles sont

matières qui diffèrent des granits et qui reposent au-dessous d'eux; 2° les agents volcaniques ont résidé ici sous le granit et travaillé dans des profondeurs très-inférieures à lui..... 3° le granit n'est pas la roche primordiale, puisqu'il est nécessairement postérieur aux matières qui supportent les masses. » (Rapport à l'Institut national sur les voyages de l'an v et de l'an vi. *Journal des mines*, t. VII, p. 397, 1798.) Quelques lignes plus loin (p. 398), Dolomieu ajoute d'ailleurs « qu'il a des raisons d'étendre ses conclusions à tous les autres volcans, quelle que soit d'ailleurs la nature du sol qui les environne; c'est partout à de grandes profondeurs ou au-dessous de l'*écorce consolidée* du globe que résident les agents volcaniques. »

[1] *Mémoires de l'Académie des sciences*, 1700. Plus tard Pallas était arrivé à faire descendre la cause des volcans jusque dans les schistes cristallins avec pyrite, semblables à ceux qu'il avait eu occasion d'observer dans l'Oural.

entretenues liquides au moyen d'une sorte de fondant tel que le soufre. Il fallut que Spallanzani exécutât une longue série d'expériences sur la fusion des laves, soit dans des creusets, soit dans des fours de verrerie, pour détruire ces préjugés[1]. L'exactitude et le génie d'observation de l'illustre professeur de Pavie se manifestent dans ses études sur la nature et l'origine des roches volcaniques, aussi bien que dans ses brillantes découvertes sur l'économie animale, et il est l'un de ceux qui ont eu le mérite d'introduire dans la géologie la méthode expérimentale[2].

Au commencement de ce siècle, de Humboldt et de Buch font ressortir la grandeur et l'universalité de l'action volcanique.

Plus tard, Alexandre de Humboldt, après avoir exploré les volcans gigantesques des deux Amériques, et Léopold de Buch, qui avait si profondément étudié la structure des îles Canaries, faisaient ressortir, par d'autres considérations, la grandeur et l'universalité de l'action volcanique, et les formes variées sous lesquelles elle se manifeste.

§ II.

ROCHES ÉRUPTIVES.

L'origine ignée des basaltes est signalée par Desmarest. Longue discussion des neptuniens et des plutonistes.

L'Auvergne, qui présente, comme l'Écosse, dans sa constitution géologique, des faits qui commandent de prime abord l'attention, a également fourni les premiers exemples bien constatés de roches ayant une origine incontestablement éruptive, sans être sorties par des volcans à cratère. Desmarest reconnut le mode de formation ignée des basaltes, dans un voyage qu'il fit en cette contrée, en 1763, et le fit connaître en 1768[3], c'est-à-dire dix-sept ans avant la publication du premier mémoire de Hutton. C'est alors que prit naissance cette longue discussion, qui dégé-

[1] *Voyage dans les Deux-Siciles.* L'original est de 1792, et la traduction de 1795; voir notamment l'introduction de l'ouvrage et le tome IV.

[2] Spallanzani a en outre découvert l'*acide marin* (acide chlorhydrique) parmi les gaz qui boursouflent les laves, et l'hydrogène dans les feux naturels de Barigazzo. En terminant ses observations relatives aux laves, Spallanzani reproduit cette opinion remarquable de Faujas-Saint-Fond : « Il n'est pas hors de possibilité que l'eau, unie avec le feu, fasse naître des combinaisons ignorées et impossibles à l'art. » T. IV, p. 75.

[3] *Mémoires de l'Académie*, 1768.

néra parfois en une vive polémique, entre les neptuniens et les plutonistes : chose digne de remarque, elle se prolongea pendant plus d'un demi-siècle, après que l'origine éruptive des basaltes eut été signalée en Auvergne, ainsi qu'en Italie, par ce même Desmarest, et dans les îles Hébrides, par Faujas-Saint-Fond, son continuateur. On peut clairement voir, par le rapport qu'en faisait Cuvier en 1808, combien, à cette époque, les arguments de l'école de Werner conservaient encore de prestige, même dans le pays où les faits plaident avec tant d'évidence la cause opposée[1], et quand de nouveaux exemples si remarquables d'intrusion de roches cristallines avaient été reconnus par Strange, Hutton, Haussmann et Léopold de Buch dans diverses autres régions de l'Europe. Sans doute la question eût été plus rapidement tranchée, si les communications et relations européennes eussent présenté à cette époque la même facilité que de nos jours.

§ III.

FORMATION DES GÎTES MÉTALLIFÈRES.

Depuis que l'on a reconnu que les filons métallifères ont été remplis, comme l'avait avancé Descartes, par des exhalaisons partant des régions profondes du globe, leur étude a contribué à porter la lumière dans le phénomène qui nous occupe : on en verra plus loin la preuve.

[1] « C'est d'après les observations de Desmarest que l'on a attribué longtemps à tous les basaltes, pierres assez semblables à certaines laves, une origine volcanique... Il paraît cependant que les terrains qui ont de la ressemblance avec les laves n'ont pas tous la même origine. Telles sont les roches nommées *wackes;* elles occupent de grandes étendues dans certaines contrées de l'Allemagne; elles y sont bien horizontales, n'y tiennent aucune élévation que l'on puisse regarder comme un cratère, reposent sur des houilles très-combustibles qu'elles n'ont pas altérées; elles ne sont donc pas volcaniques. Werner a bien démontré ces faits, et une multitude de terrains ont été dépouillés, par suite de ces observations, de l'origine qu'on leur attribuait. Tout au plus reste-t-il l'opinion de Hutton et de M. James Hall, qu'ils ont été fondus en place lors d'un échauffement général et violent éprouvé par le globe. » (Cuvier, *Rapport historique sur les progrès des sciences naturelles*, édition in-8°, p. 171 et 172.) Desmarest fut témoin de toute cette longue discussion et du rapport qui condamnait ainsi ses conclusions, car il mourut en 1815.

§ IV.

DISLOCATIONS MÉCANIQUES DE L'ÉCORCE TERRESTRE.

La théorie de la formation des chaînes de montagnes ne présente pas dans son histoire des phases moins singulières que celle des roches éruptives.

Idée fondamentale déjà émise par Descartes, 1644.

Déjà Descartes avait donné une nouvelle preuve de son admirable pénétration d'esprit, en rattachant les dislocations de la *voûte terrestre* au refroidissement et à la contraction de la masse interne[1].

Stenon prouve les dérangements subis par les terrains stratifiés, d'après les observations qu'il fait en Toscane, 1679.

Stenon, s'appuyant sur des observations précises qu'il fit en Toscane, crut pouvoir conclure, dès 1669, que les terrains stratifiés ont perdu leur horizontalité première, probablement sous l'influence des vapeurs souterraines[2]. Il publia son travail après avoir passé deux années à Paris en relation avec Descartes[3], dont le système avait évidemment produit sur lui une profonde impression.

Cependant la belle conception du philosophe français sur l'origine des aspérités du globe, malgré l'appui que Stenon lui avait

[1] « Les fentes s'augmentant, les parties externes n'ont pu se soutenir plus longtemps, et la voûte se crevant tout d'un coup, l'a fait tomber en grandes pièces sur la superficie du corps *c*; mais pour ce que cette superficie, qui n'était pas assez large pour recevoir toutes les pièces de ce corps en la même situation qu'elles avaient auparavant, il a fallu que quelques-unes soient tombées de côté et se soient appuyées les unes contre les autres. » (§ 42, p. 322 de l'édition précitée des œuvres de Desmarest.) La figure annexée représente bien clairement l'idée de Descartes.

[2] L'ouvrage publié par ce savant Danois, à la fois anatomiste et géologue, sous le titre de, *De solido intra solidum naturaliter contento, dissertatio prodromus*, dans une étendue de 76 pages seulement, constitue l'un des travaux géologiques les plus remarquables, par la justesse et l'importance des observations qui y sont consignées, par l'enchaînement et la rigueur des raisonnements, la précision du style et la forme en quelque sorte géométrique que lui a donnée son auteur, ainsi que l'a très-bien remarqué M. le docteur Bertrand de Saint-Germain. Déjà depuis longtemps M. Élie de Beaumont a signalé à l'attention les principales conclusions de Stenon dans les Annales des sciences naturelles, t. XXV, 1832. Stenon distingue aussi les roches volcaniques et les roches stratifiées, et, parmi ces dernières, les couches anciennes des couches récentes.

[3] De 1664 à 1666.

prêté, fut pendant longtemps méconnue, cédant la place à des hypothèses que l'on reconnaît aujourd'hui n'avoir aucun fondement. Leibnitz lui-même, bien que se fondant sur les idées et les observations de ces deux grands hommes, aima mieux attribuer la mise à sec des anciens fonds de mer à l'infiltration d'une partie de l'eau dans des abîmes qu'il supposait dus à d'anciennes boursouflures de la masse primitivement fondue.

Buffon, tout en faisant aussi une grande part à la chaleur primitive, ne fut pas plus heureux que Leibnitz dans les deux hypothèses opposées et contraires qu'il émit successivement sur la formation des montagnes[1].

Cette idée reste comme méconnue pendant plus d'un siècle, jusqu'à ce que les travaux de Hutton, de Léopold de Buch et de M. Élie de Beaumont la mettent hors de doute.

Ce n'est réellement que plus d'un siècle après, que Hutton, James Hall et Saussure ramenèrent par de nouvelles voies à l'idée si féconde de Descartes[2]. Cependant elle restait un peu vague, indécise et comme voilée par l'école de Werner, lorsque Léopold de Buch et M. Élie de Beaumont lui donnèrent définitivement une importance fondamentale, en la précisant, l'appuyant et la développant par des observations nombreuses et exactes[3].

On reconnut en outre que la formation des sources thermales

[1] Soit dans la mer, par le mouvement et le sédiment des eaux (*Théorie de la terre*), soit par le feu, à l'époque où le globe était encore incandescent, et, par conséquent, bien avant qu'il y eût des mers et des êtres vivants. (*Époques de la nature*, qui, on le sait, parurent environ trente ans après le premier ouvrage.)

[2] Cependant on doit des observations fort justes à Robert Hooke, à propos des tremblements de terre, 1705; à Lazzaro-Moro, 1740; à Fichtel, *Ueber die Karparthen*, 1791; à Heim, *Geologische Beschreibung des Thüringerwalds*, IIIe partie. Ce dernier observateur était déjà entré dans beaucoup de considérations ingénieuses sur la possibilité du soulèvement des chaînes de montagnes, au moyen des basaltes et des porphyres, sur les sublimations des minéraux et des métaux dans les roches, ainsi que sur les altérations produites dans diverses roches par les éruptions ignées, comme nous l'avons dit plus haut, page 17.

[3] La superposition du granit et du porphyre aux terrains de transition des environs de Christiania, que Haussmann avait déjà observée en 1805, et le soulèvement lent et graduel du sol de la Suède furent des arguments irrésistibles de Léopold de Buch. Parmi les plus anciennes observations de même nature, il faut encore citer celles du comte Marzari-Pencati, qui avait accompagné Faujas-Saint-Fond en Italie, et qui déjà alors l'avait rendu attentif à la superposition de roches réputées primitives à des terrains stratifiés, particulièrement dans le Tyrol méridional (1819).

et gazeuses, ainsi que celle des gîtes métallifères, se rattache aux systèmes de cassures que présente l'écorce terrestre, même dans les régions qui ne sont pas traversées par des roches éruptives[1].

§ V.

CHALEUR INTERNE DU GLOBE DÉMONTRÉE PAR DES MESURES DIRECTES.

Les mesures directes de la température interne sont comparativement récentes.

Quoique la chaleur interne du globe constitue le fondement de tout le système de Hutton, c'est seulement plus tard que ce fait capital a été constaté d'une manière positive, c'est-à-dire à l'aide de mesures assez exactes et en nombre suffisant pour qu'il fût établi d'une manière incontestable. Par une exception qui est rare dans les sciences d'observation, les idées spéculatives avaient, dans ce cas particulier, devancé la découverte de la réalité. Avant le premier mémoire de Hutton on ne possédait guère, sur l'accroissement de température dans les lieux profonds, que l'indication assez vague rapportée par Kircher en 1664[2], et les observations que fit Gensanne, en 1749, dans les mines de Giromagny. Les mesures prises en Saxe par Freiesleben et de Humboldt datent de 1791; elles sont donc antérieures seulement à la seconde édition de l'ouvrage du chef de l'école écossaise. A partir de cette époque, les observations sur ce sujet se succèdent en grand nombre jusqu'à nos jours; les principales sont dues à d'Aubuisson, de Trebra, Arago, Dulong, MM. R. Fox, Boussingault, Reich, De la Rive, Ermann, Walferdin et divers autres. Il existait cependant encore des causes d'erreur qui soulevaient des objections sur le fait principal, lorsque M. Cordier, dans son Essai sur la température de la terre (lu en 1823 à l'Académie des sciences et publié en 1827), leva les derniers doutes. Antérieurement à

[1] Fr. Hoffmann, l'un des premiers, a très-bien fait ressortir cette sorte de relation pour les sources gazeuses du nord de l'Allemagne. (*Nordwestliches Deutschland*, 1830.)

[2] Les observations faites sur la demande de Kircher, par Schapelmann, Bergmeister, à Herrengrund, en Hongrie, établissent simplement que les mines, quand elles sont sèches, sont d'autant plus chaudes qu'elles sont plus profondes. (*Mundus subterraneus*, t. II, p. 184 et 185.) Les mesures prises par Guettard (1762), Deluc et Saussure (*Voyages*, § 1088) ne pouvaient non plus conduire à une induction certaine.

cette publication, ce savant, chez lequel la vue de Ténériffe avait depuis longtemps corroboré les idées qu'il avait puisées auprès de Dolomieu, avait rigoureusement défini, à l'aide d'un procédé d'analyse nouveau, la constitution minéralogique des roches volcaniques et l'analogie qui unit toutes ces roches, lors même qu'elles sont de nature variée[1].

Travaux des géomètres sur la chaleur planétaire.

Enfin on sait que plusieurs géomètres ont cherché à étudier par le calcul les conditions intérieures du globe aux différentes époques. Je ne puis que signaler ici les recherches importantes faites dans ce but par Fourier, Lagrange, Laplace et Poisson[2].

En résumé, c'est par plusieurs voies très-différentes que l'on est arrivé à admettre au rang d'idée mère, en géologie, l'idée de la chaleur interne, et à reconnaître l'importance de la doctrine du métamorphisme, qui s'y rattache comme un effet à sa cause.

CHAPITRE V.

MODIFICATIONS SURVENUES DEPUIS HUTTON DANS LES IDÉES RELATIVES AU MÉTAMORPHISME[3].

La voie sèche est longtemps admise comme unique cause des phénomènes métamorphiques.

Jusqu'à l'époque à laquelle nous nous sommes arrêtés plus haut, au chapitre III, on avait dû, à l'exemple de Hutton, considérer la chaleur, aidée de quelques substances volatiles, comme la cause à peu près exclusive de tous les phénomènes métamorphiques. On pensait que les roches transformées ont cristal-

[1] Recherches sur différents produits des volcans. (*Journal des mines*, t. XXI, p. 249, 1807; t. XXIII, p. 35, 1808.) Mémoire sur les substances minérales dites en masse qui entrent dans la constitution des roches volcaniques de tous les âges. (*Journal de physique*, t. LXXXIII, 1816.)

[2] On peut encore citer : Élie de Beaumont, Note sur le rapport qui existe entre le refroidissement progressif de la masse du globe terrestre et celui de la surface (*Comptes rendus*, t. XIX, 1844, et l'*Institut*, p. 32, 1845); Libri, Mémoire sur la théorie mathématique des températures terrestres (*Annales de chimie et de physique*, t. II, p. 387); plusieurs mémoires importants de M. Hopkins et de M. Hennessy.

[3] Au lieu d'attribuer, comme le faisait Hutton, la chaleur subie ultérieurement par certains sédiments à la température du fond de la mer, que l'on sait maintenant être très-basse, on l'explique par d'autres causes, ainsi qu'on le verra dans la troisième partie de ce travail.

lisé, après avoir été ramollies et peut-être imbibées par les masses ignées voisines ou sous-jacentes[1]. Nous verrons un peu plus loin que toutes les expériences synthétiques des ateliers métallurgiques et des laboratoires semblaient ratifier complétement cette manière de voir. Certains faits plus attentivement observés vinrent se mettre à l'encontre d'une hypothèse si généralement admise[2]. C'est en vain que, pour lever des objections sérieuses qui naquirent alors, on fit intervenir des actions de cémentation, d'électricité[3], de dissolution possible de certains silicates les uns par les autres. Des doutes profonds avaient pris naissance, et depuis lors ils ne firent que grandir. A ce moment une voie nouvelle semble s'ouvrir; nous verrons bientôt ceux qui s'y sont avancés les premiers.

Origine aqueuse admise d'abord pour les dépôts métallifères. 1830 à 1839.

On a d'abord reconnu que les filons métallifères ne peuvent pour la plupart avoir été remplis ni par voie de fusion, ni par voie de sublimation, mais qu'ils ont dû l'être par des matières tenues en dissolution dans des eaux qui étaient à une haute température.

Les remarques de M. Longchamp sur la relation entre les sources thermales de Chaudesaigues et le filon de pyrite de fer duquel elles jaillissent[4], et, d'autre part, les ingénieuses expériences par lesquelles M. Becquerel arrivait à imiter, par voie humide, la galène, l'antimoine sulfuré et d'autres minéraux des

[1] Boué, Mémoire cité plus haut, 1824. Fournet, Lettre sur les modifications que certaines roches ont subies par l'action d'autres roches. (*Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. LX, p. 291, 1836.) Simplification de l'étude d'une certaine classe de filons. (Société des Sciences de Lyon, 1845. *Bulletin de la Société géologique de France*, 2e série, t. IV, p. 222.) M. Fournet, qui a personnifié cette école en France, compare ces phénomènes à l'imbibition des parois d'une coupelle. Les ganglions quartzeux renfermés dans les micaschistes n'auraient pas d'autre origine. Le quartz, par suite d'un état de *surfusion* particulier, aurait pu se consolider après des substances plus fusibles. C'est encore ainsi que M. Fournet explique l'altération de la roche éruptive par la roche encaissante, altération qu'il nomme *endomorphisme*.

[2] Voir particulièrement le chapitre Ier de la IIIe partie de ce mémoire.

[3] M. Virlet a attribué les effets de métamorphisme à des actions électro-chimiques, peut-être développées par le concours d'une haute température. (*Bulletin de la Société géologique de France*, t. V, p. 313, 1835.)

[4] *Annales de chimie et de physique*, t. XXXII, p. 294, 1826.

filons, contribuèrent à ramener les vues dans cette direction[1]. Dès 1833, M. Fournet, après avoir étudié les filons de Pontgibaud, en Auvergne, concluait qu'ils ont été probablement remplis par des incrustations d'eaux minérales[2]. La ressemblance minéralogique entre les filons de la Saxe et les dépôts siliceux et métallifères du lias de la Bourgogne, qui, selon toute probabilité, n'ont pu s'y épancher que par voie humide, confirmait cette idée théorique, que M. Élie de Beaumont professait depuis longtemps dans son cours de l'École des mines : M. le baron de Beust en reconnut la justesse[3]. D'ailleurs, comme le faisait encore observer M. Élie de Beaumont : « Les filons se trouvent généralement près des lignes de contact des roches stratifiées avec les roches non stratifiées qui les ont pénétrées; et telle est aussi la position habituelle des sources thermales qui, de nos jours, déposent encore assez fréquemment diverses substances pierreuses ou métalliques dans les canaux qu'elles parcourent[4]. » La conclusion importante sur le mode de remplissage des filons, à laquelle conduisaient ces divers rapprochements, était plus différente encore, au fond, de l'hypothèse de Werner que de celle de Descartes et de Hutton.

[1] *Annales de chimie et de physique*, 1829, 1832 et 1833.

[2] *Bulletin de la Société géologique de France*, t. V, p. 188. M. Boubée a attribué la même origine aux gîtes de fer et autres qui, dans les Pyrénées, sont situées sur la limite du granit et des terrains stratifiés. (Même recueil, t. III, p. 251, 1833.) En 1837, M. Robert Were Fox montra dans ses *Observations on mineral veins* (*Report of the royal Cornwall polytechnic society*, 1836), comment les filons paraissent devoir leur origine à des sources thermales; il attribuait leur formation à des effets thermo-électriques, dont il croyait trouver des indices dans les expériences qu'il avait faites sur les filons. M. de la Bêche adopta ces idées dans son *Geological Report on Cornwall and Devon*, 1839.

[3] *Kritische Beleuchtung der Wernerschen Gangtheorie*, p. 6, 1840. L'auteur y signale la ressemblance frappante des dépôts renfermés dans les couches d'arkose de la Bourgogne avec les filons de Freyberg. Les intéressantes observations de M. Bischof, sur la formation de la pyrite de fer et sur les sources minérales, contribuèrent à préparer ce résultat. Le Mémoire qu'il a publié sur le remplissage des filons date de 1843. (*Ueber die Entstehung des Quarzes und Erzgänge.*)

[4] *Explication de la carte géologique de France*, t. I, p. 43.

D'ailleurs, l'étude des terrains métamorphiques eux-mêmes montrait des circonstances que la voie sèche ne peut expliquer, notamment l'étendue et l'uniformité des massifs transformés, le mode de dissémination et d'agencement de minéraux qui ont pris naissance dans des roches, qu'on reconnaissait n'avoir pas été ramollies et n'avoir jamais subi une température très-élevée. Ces dernières conclusions reposent sur des faits qui seront signalés dans la troisième partie de ce travail.

Induction semblable tirée de l'étude des roches métamorphiques elles-mêmes.

M. Durocher, à la suite d'un Mémoire important publié en 1846[1], où il consigna beaucoup d'observations qui lui sont propres, attribua les effets du métamorphisme à des actions lentes et à des transports moléculaires très-analogues à la cémentation.

Observations de M. Durocher et autres, sur ce sujet.

D'autres considérations qui portaient à conclure que l'eau a probablement servi de véhicule à la chaleur dans le métamorphisme sont dues à Fuchs, à MM. Sillimann et Dana[2], et à M. Schafhaütl[3]. Il convient surtout de rappeler ici les nombreux travaux de M. Bischof, qui, muni d'une critique très-judicieuse et des armes de la chimie, n'a cessé de combattre depuis longtemps les idées ultra-plutoniques qui étaient en vogue à l'époque où nous parlons[4]. M. Volger, suivant cet exemple, a aussi apporté des arguments contre l'action de la chaleur, qu'il repousse même entièrement.

Nombreux arguments en faveur de la voie humide; M. Bischof, 1847.

Après avoir étudié, dans leurs principales particularités, les phénomènes volcaniques de l'Islande, M. Bunsen appelait l'attention sur l'action des gaz et de l'eau possédant des températures comparables à celle des fumarolles actuelles, et il considérait ces

Conclusions semblables d'autres géologues.

[1] Études sur le métamorphisme. (*Bulletin de la Société géologique de France*, 2e série, t. III, p. 547, 1846.) Métamorphisme dans les Pyrénées. (*Annales des mines*, 3e série, t. VI, p. 78.)

[2] Si une roche est frittée jusqu'à quinze mètres, elle devrait être fondue au moins sur la moitié de cette épaisseur, dans le cas où la chaleur serait cause de la transformation. La chaleur paraît avoir eu l'eau pour véhicule. (*Sillimann's Journal*, t. XLV, 1843.)

[3] *Leonhards Jahrbuch*, 1845, p. 858.

[4] L'ouvrage si riche en observations, intitulé, *Lehrbuch der chemischen und physikalischen Geologie*, par M. Bischof, a été publié de 1847 à 1855.

agents comme une cause de métamorphisme au moins aussi puissante que la chaleur[1].

Résultats du travail de M. Delesse sur le métamorphisme de contact.

Dans ces derniers temps, M. Delesse a examiné, à l'aide de l'analyse chimique, la nature des roches éruptives et celle des roches encaissantes aux abords de leur contact[2]. Des faits nombreux l'ont également porté à conclure que les roches trappéennes et granitiques auraient modifié les roches encaissantes, moins par leur chaleur propre que par des émanations aqueuses, chargées de diverses substances salines ou acides.

Intervention de l'eau et d'autres éléments, reconnue comme très-probable dans la cristallisation du granit.

En même temps que les observations dont nous venons de parler tendaient à faire admettre l'action de l'eau dans le métamorphisme, on reconnaissait, à l'aide d'autres faits, que la roche éruptive à laquelle on a attribué la puissance de transformation la plus énergique sur les masses encaissantes, le granit, n'a lui-même pu être formé par voie de fusion purement ignée. Breislack[3], Fuchs, de Boucheporn, M. Schafhaütl et M. Schee-

[1] *Ueber den innern Zusammenhang der pseudovulkanischen. Erscheinungen Islands.* (*Annalen der Chemie und Pharmacie*, t. LXII, p. 1, 1847.) *Ueber die Processe der vulkanischen Gesteinbildungen Islands.* Pogg. (Ann. 1851, p. 83, 197. *Leonhards Jahrb.* 1851, p. 537.) Je citerai encore M. Cotta, qui, en décrivant les grands effets du métamorphisme des Alpes, a aussi remarqué avec justesse que de tels effets ne peuvent avoir eu lieu sans la coopération de l'eau qui provenait, soit de l'humidité des roches, soit de sources chaudes. (*Geologische Briefe aus den Alpen*, p. 243, 1850.) M. Sterry-Hunt a émis des idées ingénieuses sur l'action de la voie humide dans le métamorphisme et les autres phénomènes chimiques : il les a résumées dans un mémoire récent. (*Quarterly journal of the Geol. society*, 1859, t. XV, p. 488.)

[2] Études sur le métamorphisme. (*Annales des mines*, 5e série, t. XII et XIII, 1857 et 1858.)

[3] Breislack, quoique combattant avec force les idées des neptuniens, avait déjà remarqué, en se fondant sur l'ordre de consolidation des éléments du granit, et la présence de gouttes de liquide que renferme quelquefois son quartz, qu'il est difficile d'admettre que cette roche ait été à l'état de véritable fusion. (*Institutions géologiques*, traduction française, 1818.) « Pourquoi le feu et l'eau ne pourraient-ils pas avoir coopéré à la production de notre terre à diverses époques et quelquefois même en réunissant leurs efforts ? » (T. I, p. 68.) Ainsi il cherchait à poursuivre l'idée que Faujas-Saint-Fond et Spallanzani avaient déjà entrevue : il rapprochait deux agents qui ne s'excluent aucunement, comme le prétendaient alors les deux

rer[1] conclurent, de l'abondance de ses grains de quartz isolés, du mode de groupement de ses éléments, enfin de la présence des minéraux pyrognomoniques qu'il renferme parfois, que le granit devait avoir renfermé originellement de l'eau; en outre, que la présence de cette eau pouvait avoir prolongé la plasticité de la masse beaucoup au-dessous de son point de fusion actuel. M. Élie de Beaumont montra, de plus, que le granit doit très-probablement sa composition minéralogique à diverses substances qui depuis sa consolidation auraient en partie disparu, avec l'eau, telles que des composés chlorés, fluorés, borés. Ainsi, « le mode de formation du granit doit avoir un caractère intermédiaire entre l'origine des filons ordinaires et l'origine des éruptions volcaniques et basiques[2]; » et l'état uniquement cristallin de cette roche ne provient pas de ce qu'elle se serait solidifiée à de grandes profondeurs.

Les ingénieuses observations microscopiques de M. Sorby ont confirmé entièrement le fait de l'intervention de l'eau et de la chaleur dans la formation du granit[3]. Déjà, je dois le rappeler à cette occasion, les gouttelettes de liquide que l'on distingue à l'œil nu dans certains cristaux avec des matières gazeuses avaient fixé l'attention de Davy, et leur examen avait fait soupçonner à ce savant que l'eau a concouru, avec l'aide de la pression, à la for-

écoles antagonistes : il les voyait, au contraire, intimement associés dans les volcans, dont il avait fait une étude approfondie. « Si, dit ailleurs Breislack, les expériences doivent servir de guide au philosophe, et si celles qui s'effectuent dans les volcans sont les plus importantes que nous puissions recueillir, pourquoi ne nous sera-t-il pas permis d'en faire usage ? »

[1] Discussion sur la nature plutonique du granit et des silicates cristallins qui s'y rallient. (*Bulletin de la Société géologique de France*, 2e série, t. IV, p. 468, février 1847.) Réponses aux objections de M. Durocher. (Même recueil, t. VI, 644, et VIII, 500.)

[2] Élie de Beaumont, Note sur les émanations volcaniques et métallifères. (*Bulletin de la Société géologique de France*, 2e série, t. IV, p. 1291.)

[3] *On the microscopical structure of cristals*, etc. (*Quarterly journal of Geol. society*, 1858, p. 453. *Comptes rendus de l'Académie*, t. XLVI, p. 146, avec des observations de M. Élie de Beaumont.)

mation du cristal de roche; plus tard sir David Brewster avait étendu ce genre de recherches[1].

Un autre ordre de faits a encore confirmé dans cette induction, que le granit a pu être à l'état plastique sans pour cela qu'il ait possédé une température très-élevée : c'est que les roches au milieu desquelles il a été injecté à l'état pâteux ne présentent quelquefois qu'une modification à peine sensible, même à leur contact immédiat avec lui[2].

Fait analogue pour les autres roches éruptives.

Les roches éruptives, autres que le granit, paraissent également avoir été formées avec le concours de l'eau, et, pour la plupart, à une température bien moins élevée qu'on ne l'avait supposé[3].

Si les roches éruptives elles-mêmes sont dépossédées du prestige de haute température dont elles ont longtemps joui, il est bien difficile d'admettre que leur chaleur puisse avoir, par elle seule, produit les effets énergiques qu'on lui a souvent attribués.

En résumé, la chaleur paraît avoir eu l'eau pour collaborateur dans des phénomènes très-différents, mais connexes.

C'est ainsi que l'on est arrivé, en quelque sorte par trois voies différentes, à la conclusion que l'eau, aidée de quelques substances, devait avoir été à peu près partout, dans le métamorphisme, aussi bien que dans la formation des principaux gîtes métallifères et des roches éruptives, un coopérateur très-puissant de la chaleur.

Observations confirmant l'origine épigénique de certaines dolomies.

J'ai déjà parlé des premières observations qui ont fait connaître l'état métamorphique de certaines dolomies. Depuis lors, on a confirmé cette origine dans diverses contrées. M. Lardy, dans son excellent Mémoire sur la constitution géognostique du Saint-Gothard (1829), remarquait que la dolomie et le gypse doivent avoir une relation avec l'ouverture de la crevasse

[1] *Annales de chimie et de physique*, t. XXI, p. 182, 1822. La topaze du Brésil renferme aussi divers liquides, d'après sir David Brewster. (*Poggendorffs Annalen*, VII, 493.)

[2] M. Delesse a résumé récemment les faits qui le prouvent, en y comprenant ses propres observations sur le métamorphisme de contact dans ses Recherches sur l'origine des roches. (*Bulletin de la Société géologique de France*, 2e série, t. XV, p. 728.) M. Henri Rose a aussi tout récemment émis des arguments dans le même sens. (*Ueber die verschiedenen Zustände der Kieselsaüre*, 1859.)

[3] Le Mémoire précité de M. Delesse en énumère les principales preuves.

qui forme la vallée du Tessin[1]. Les polypiers convertis en dolomie et trouvés par M. de Verneuil à Gerolstein ont fourni d'ailleurs, en faveur de la transformation de cette roche, un argument que M. Élie de Beaumont a depuis longtemps fait valoir.

Calcul de M. Élie de Beaumont à ce sujet.

M. Élie de Beaumont, s'appuyant en outre sur l'état si remarquablement caverneux et fendillé de beaucoup de dolomies, telles que celles du Tyrol, de Lugano, de la Franconie, a montré, dès 1829, que cette structure doit résulter d'une épigénie et de la substitution du carbonate de magnésie au carbonate de chaux en proportions équivalentes[2].

Production simultanée de la dolomie et du gypse attribuée à des eaux minérales par MM. de Collegno et Haidinger.

Quant à la manière dont cette substitution peut avoir eu lieu, l'étude des dolomies et des gypses de la vallée du Tessin avait suggéré à M. de Collegno, déjà en 1834, l'idée que le carbonate de chaux a vraisemblablement été transformé simultanément en gypse et en dolomie par l'action d'eaux minérales, et même la pensée de rechercher les traces de ces eaux dans le Val Canaria[3]. C'est cette même vue théorique qui a conduit plus tard M. Haidinger et M. de Morlot à imiter artificiellement la dolomie[4].

Toutefois, dans beaucoup de terrains stratifiés, tels que le trias, la dolomie est en couches régulières. S'il y a eu une substitution, elle a dû s'opérer au moment même de son dépôt. Cette réserve a été faite par M. Élie de Beaumont, notamment en faveur des dolomies des marnes irisées[5].

[1] *Denkschrift des Schweizerische Gesellschaft*, 1829, t. I, p. 200.

[2] Élie de Beaumont, Note sur la forme la plus ordinaire des objections relatives à l'origine de la dolomie. (*Annales des sciences naturelles*, t. XVIII, p. 269, 1829. *Bulletin de la Société géologique de France*, t. VIII, p. 173, 1836.)

[3] Notes sur quelques points des Alpes suisses. (*Bulletin de la Société géologique de France*, t. VI, p. 110, 1834.)

[4] Quelques savants, entre autres MM. Daubeny, Leube et Grandjean, considérèrent aussi la dolomie comme résultant de l'attaque du calcaire magnésien par les eaux atmosphériques. (*British ass.* 1845.) D'autres, comme MM. Rozet et Puggaard, ont attribué une origine éruptive à certaines dolomies, qui ont la forme de filons, et contiennent des fragments empâtés (Framont, Grisons, Fulda, Helsingfors et Sorrente).

[5] Observations sur les différentes formations qui, dans le système des Vosges, séparent la formation houillère de celle du lias. (*Mémoires pour servir à une description géologique de la France*, t. I, p. 78, 153, 192.)

Il a été aussi reconnu que, dans certains gisements, le gypse résulte d'une transformation du calcaire. Je mentionnerai seulement les observations d'Hoffmann et de M. Coquand sur les gypses produits par les fumarolles, aux îles Lipari et en Toscane; et celles de M. Dufrénoy sur les gypses associés aux ophites des Pyrénées.

La formation de la dolomie, celles de l'anhydrite et du sel gemme ont donné lieu à d'autres travaux très-nombreux que je ne puis mentionner ici[1].

CHAPITRE VI.

MÉTAMORPHISME DE STRUCTURE.

Du temps de Hutton, on n'avait pas encore remarqué que la structure feuilletée, si fréquente dans des massifs entiers de roches, résulte d'une action postérieure à leur formation, et, par conséquent, constitue aussi un métamorphisme.

Distinction établie entre la schistosité et la stratification, dès le commencement du siècle.

La différence que nous reconnaissons aujourd'hui entre la structure feuilletée et la stratification a cependant été déjà décrite, au commencement de ce siècle, par divers auteurs, parmi lesquels on doit citer Lasius[2], Voigt[3], Moll[4], de Hoff[5], Schmidt[6]. En Angleterre, M. John Philipps avait très-bien reconnu, dans le Yorkshire, la différence entre le vrai et le faux clivage. M. le professeur Sedgwick[7] confirma ensuite et généralisa le fait, en montrant que, dans le pays de Galles, les feuillets sont le plus ordinairement obliques à la stratification[8].

[1] Parmi les principaux, je rappellerai l'ouvrage de M. d'Alberti, les Mémoires de MM. Fournet et Boué. (*Ueber die Dolomite-Sitzungsberichte der Acad. der Wissens. zu Wien*, t. XII, p. 422, 1854.)

[2] *Das Harzgebirge.*

[3] *Praktischen Gebirgskunde*, 1797.

[4] *Molls Ephemeriden*, t. III, p. 71, 1807.

[5] Carrières d'ardoises de Lehesten, en Franconie.

[6] En Westphalie.

[7] *On the chemical changes produced on the aggregate of stratified rocks.* (*Transact. Geol. societ.* t. III, p. 354, 1835.)

[8] M. l'ingénieur des mines Parrot avait établi la même distinction dans les ar-

Un autre fait très-remarquable a été signalé par M. Sedgwick, c'est la constance surprenante avec laquelle les feuillets se poursuivent sur de grandes étendues, et même au milieu des contournements les plus prononcés des couches auxquelles ils appartiennent. Cette observation a été parfaitement confirmée par MM. Studer et Forbes dans les Alpes, sir Roderick Murchison, M. Darwin, dans les Andes, M. Rogers dans les monts Apalaches[1], et d'autres.

Constance de direction des feuillets.

Il existe toutefois, entre la position des feuillets et celle des couches, des relations que M. Baur et M. Sharpe ont fait ressortir avec une grande sagacité.

Leurs relations avec les contournements des couches.

La cause du développement de la structure feuilletée des phyllades a été attribuée à des actions cristallines, polaires ou électriques. Ces vagues hypothèses ne pouvaient guère s'appuyer que sur ce résultat, annoncé par M. Robert Fox, que l'argile humide, en présence de courants électriques, peut devenir sensiblement feuilletée[2]. Ces causes, qu'on pourrait qualifier d'occultes, ont cependant été adoptées par des savants éminents, tels que M. Sedgwick, sir Henry de la Bêche[3], sir John Herschel[4], M. Hopkins[5] et M. Scheerer[6].

Hypothèses émises sur la cause du développement de la structure feuilletée.

Ceci s'explique; car le fait remarquable qui était le plus particulièrement propre à guider vers une saine explication n'a été découvert qu'assez récemment par M. le Bergmeister Baur[7]. Ce géo-

M. Baur reconnait qu'une pression mécanique a accompagné la production des feuillets, 1846.

doises des Ardennes, d'après un rapport manuscrit de 1826. (*Explication de la carte géologique de France*, t. I, p. 262.)

[1] *Proceedings of american naturalist and geologist*, 1845.

[2] *Report on Cornwall polytechnic society*, 1837. M. R. Hunt a fait plus tard des expériences du même genre. (*Memoirs of the Geological survey of Great Britain*, t. I, p. 433.)

[3] *Geological report on Cornwall and Devon*, p. 281, 1839. Les forces polaires, suppose l'auteur, seraient probablement en relation avec le magnétisme terrestre.

[4] Lyell, *Manuel de géologie*, 5e édition, t. II, p. 448.

[5] *On the connexion of geology with terrestrial magnetism.*

[6] *Karstens Archiv. für Mineralogie*, t. XVI, p. 109, 1842. M. Darwin a également proposé une explication de ce genre. (*Geological observations on South America*, p. 168.)

[7] Baur, *Ueber die Lagerung des Dachschiefers und über die von der Schichtung*

logue a le premier montré, dans un travail très-remarquable (1846), que le clivage a pris naissance lors du contournement des couches, et qu'il paraît résulter d'une pression, normalement à laquelle il s'est développé.

Conclusion semblable à laquelle est arrivé M. Sharpe, 1847.

Ce n'est qu'un an plus tard que M. Sharpe, à qui l'on a souvent accordé la priorité, est arrivé à la même conclusion, par d'autres observations très-précises relatives à la déformation qu'ont subie les fossiles. Il a ensuite établi le même fait pour des roches dans lesquelles on ne trouve pas de débris organiques[1].

Observation et expérience de M. Sorby à ce sujet, 1853.

La première tentative pour imiter mécaniquement le phénomène a été exécutée par M. Sorby, auquel on est redevable d'autres recherches ingénieuses[2]. Il avait d'ailleurs reconnu, par un examen microscopique de la disposition de leurs éléments, ainsi que par le refoulement de certains lits minces, que les roches schisteuses ont éprouvé une compression.

M. Tyndall imite artificiellement les schistes, 1856.

M. John Tyndall alla plus loin : il produisit une structure feuilletée, tout à fait semblable à celle de l'ardoise, dans différentes substances plastiques, comme la terre de pipe et la cire, en les comprimant et les soumettant à une espèce de laminage[3]. C'est sans doute par là que cet habile physicien a été conduit plus tard à s'occuper de la structure et du mouvement des glaciers.

Application du calcul à ce sujet.

Je terminerai en rappelant que M. Laugel, ingénieur des mines, et M. le professeur Haughton ont cherché à soumettre au calcul les effets de pression qui ont produit la schistosité.

L'histoire de la succession des idées sur la formation des feuillets

abweichende Schieferung des Thonschiefers. (*Karstens Archiv.* t. XX, p. 398, 1846.) La conclusion de M. Baur est surtout déduite de divers exemples de glissement fort habilement observés.

[1] *Quarterly journal of the Geological society of London*, t. III, p. 74, 1847. Plus tard M. Sharpe a publié un excellent mémoire sur le même sujet. (*Geological proceedings*, novembre, 1854.) M. H. Clifton s'en est également occupé.

[2] En laminant de l'argile dans laquelle il avait disséminé des paillettes d'oxyde de fer, M. Sorby a vu qu'elles s'alignent perpendiculairement à la pression. (Edinb. *Phil. Journal*, 1853. *Quarterly journal*, t. X, p. 73, 1854.)

[3] *Comparative view of the clivage of crystals and slate rocks.* (*Philosophical magazine*, 1856.)

dans les roches schisteuses, remarquons-le en passant, montre à quel point il importe de ne pas sortir de la voie des observations et des faits, et combien il est facile d'errer, surtout en géologie, dès qu'on s'en écarte.

Usage tardif de l'expérimentation.

Une circonstance à noter, c'est qu'après qu'on eut déduit de l'observation la probabilité du rôle de la pression mécanique, comme cause du phénomène, il ne fallut pas moins de dix ans pour qu'on eût l'idée de recourir à l'expérimentation à l'effet de vérifier cette hypothèse.

CHAPITRE VII.

MENTION DES AUTRES OBSERVATEURS QUI SE SONT OCCUPÉS DU MÉTAMORPHISME.

Principaux observateurs qui se sont occupés du métamorphisme, à part ceux dont il vient d'être question.

Les faits sur lesquels est fondé le métamorphisme ont été reconnus dans toutes les régions du globe, depuis trente ans surtout que l'attention a été portée sur ce sujet, par bien d'autres observateurs, dont quelques-uns ont beaucoup exagéré ou faussé la portée du phénomène. Les observateurs sont même si nombreux, qu'il serait impossible, sans allonger démesurément ce travail, de signaler autre chose que les principaux noms. Ce sont :

En France, MM. Alexandre Brongniart, d'Omalius[1], de Bonnard[2], Fournet[3], de Boblaye[4], Virlet[5], A. Burat, de Bouche-

[1] Brongniart et d'Omalius, sur le Cotentin, 1814. (*Journal des mines*, 1835.)

[2] Les accidents métallifères siliceux et dolomitiques, qui marquent, sur beaucoup de points de la France centrale, le contact du lias et du granit, et sur lesquels M. de Bonnard a le premier appelé l'attention, se lient certainement de près au métamorphisme. (*Annales des mines*, 1re série, t. VIII, 1824.)

[3] Outre les Mémoires où M. Fournet a fait connaître, depuis 1836, beaucoup d'observations précises et de remarques ingénieuses sur le métamorphisme, et dont j'ai mentionné plus haut un certain nombre, le savant professeur de Lyon a réuni à la Faculté des sciences une collection intéressante qui a été étudiée par beaucoup de savants. Je citerai encore ses Études sur les Alpes.

[4] La découverte de schistes, à la fois maclifères et renfermant beaucoup de fossiles, dans les terrains de transition les plus modernes, par M. Boblaye, a introduit un nouvel élément bien positif dans la question du métamorphisme. (*Comptes rendus de l'Académie*, 1838, et *Bulletin de la Société géologique*, 1re série, t. X, p. 227.)

[5] M. Virlet a depuis longtemps fait connaître de nombreux effets de métamorphisme en Grèce; il a même étendu les idées du métamorphisme à l'extrême, en

porn[1], Gras[2], Ch. Deville, Coquand[3], Puton[4], Gueymard, Lory, Angelot, Drouot, Delanoue;

En Angleterre, sir James Mackenzie, Jameson, Conybeare, Buckland, Greenough, sir Roderick Murchison[5], Sedgwick, sir Henry de la Bêche[6], John Philipps[7], le colonel Portlock, Daubeny, Poulett-Scrope, Henslow, Ramsay;

En Allemagne, MM. de Humboldt, Naumann[8], de Leonhard, Mitscherlich, Haussmann, W. Haidinger[9], B. Cotta, G. Rose, Abich, d'Alberti, Bunsen, de Morlot, Blum[10], Credner;

les appliquant aux roches éruptives, telles que le granit, la protogyne, le trachyte. (*Géologie de la Grèce*, p. 67, 184, 294, 298, 304 et 306; *Bulletin de la Société géologique*, 1re série, t. VI, p. 279 et 313, 1834; t. VII, p. 310, 1835. *Métamorphisme normal et probabilité de roches non primitives à la surface du globe*, même recueil, 1re série, t. XIV, p. 501.)

[1] De Boucheporn, en exagérant l'action que j'avais antérieurement attribuée au fluor, a admis que, par l'échauffement, la matière élémentaire du granit a dégagé des fluorures de silicium et de métal alcalin, qui sont la cause de la transformation de la roche voisine (p. 271 de son ouvrage). Son idée originale sur l'action du cyanogène dans la formation du globe mérite aussi d'être rappelée.

[2] M. Gras a fait d'importantes observations sur les roches cristallines des Alpes, du Dauphiné et de la Savoie, et considéré les spilites de cette chaîne comme métamorphiques.

[3] M. Coquand a fourni des faits très-intéressants au métamorphisme, particulièrement en décrivant les solfatares de la Toscane et en étudiant la formation des gypses et de la dolomie.

[4] L'ouvrage de M. Puton sur les Métamorphoses survenues dans certaines roches des Vosges, 1838, renferme aussi beaucoup de faits bien observés.

[5] Les ouvrages de sir Roderick Murchison sur les terrains siluriens de l'Angleterre, sur les Alpes et l'Oural, présentent de nombreux et importants exemples de métamorphisme.

[6] Sir Henry de la Bêche, dans son Manuel géologique, dans l'Art d'observer, dans ses Recherches théoriques, enfin dans le *Geological report on Cornwall and Devon*, a émis, sur le métamorphisme, comme sur tous les sujets de la géologie, une foule d'observations judicieuses et fines.

[7] Parmi, les travaux de M. J. Phillips, il faut citer ici le Rapport sur le clivage schisteux qu'il a inséré dans les Mémoires de l'Association britannique.

[8] A part les observations qu'il a faites en Saxe et en Norwége, M. Naumann a exposé en détail ce qui concerne le métamorphisme dans son excellent Traité de géognosie.

[9] M. Haidinger a proposé de distinguer les métamorphismes *anogène* et *catogène*, selon qu'ils s'exercent près de la surface ou dans la profondeur.

[10] Dans ses Études sur les pseudomorphoses, M. Blum a fait connaître beaucoup de faits qui intéressent le métamorphisme.

En Suisse et en Italie, MM. Escher de la Linth[1], de Charpentier, Lardy, de Collegno[2], A. de la Marmora, A. Favre[3], de Marignac, Théobald;

Dans la presqu'île scandinave, M. A. Erdmann;

En Amérique, MM. Rogers, Hithcock, Whitney, sir William Logan, Sterry Hunt[4].

CHAPITRE VIII.

HISTOIRE DES EXPÉRIENCES SYNTHÉTIQUES POUVANT ÉCLAIRER LA QUESTION DU MÉTAMORPHISME.

Expériences synthétiques sur la formation des minéraux et des roches. Idée de Leibnitz.

Les progrès que nous venons de résumer ont coûté plus d'efforts qu'on ne pourrait le supposer aujourd'hui, car on n'avait guère pour se conduire que les faits géologiques, soit anciens, soit contemporains, tels que les offre la nature. Aussi serait-on resté dans des aperçus nécessairement un peu vagues, si l'expérience synthétique n'était venue, à la suite de l'observation directe, pour la compléter et en fixer les résultats.

J'ai cru devoir énumérer à part, et avec quelques détails, les principales tentatives qui ont été faites jusqu'à présent pour imiter artificiellement les minéraux et les roches. Elles jettent du jour sur les divers procédés qui peuvent avoir été mis en jeu dans les réactions si variées de la nature; d'ailleurs, ce sont les premiers pas dans une méthode qui paraît appelée à répandre une vive lumière sur la géologie, et, en particulier, sur le métamorphisme.

Déjà Leibnitz avait profondément apprécié toute l'utilité de l'expérience pour l'explication de la formation des terrains, et il avait comparé, autant qu'il était alors possible, les produits de la nature à ceux du laboratoire[5]; mais c'est sous l'inspiration de

[1] Observations très-nombreuses faites en Suisse avec M. Studer.

[2] *Sur le métamorphisme des terrains de sédiment*, Bordeaux, 1842.

[3] *Notice sur la géologie du Tyrol allemand.*

[4] M. Sterry Hunt, dont j'ai mentionné précédemment (p. 34) l'un des principaux travaux, s'est aussi occupé de l'origine métamorphique des serpentines et des dolomies.

[5] « Il fera, selon nous, une œuvre importante, celui qui comparera soigneusement les produits tirés du sein de la terre avec les produits des laboratoires; car

Hutton que les premières expériences synthétiques importantes ont été entreprises[1].

Fusion et refroidissement des roches.

Buffon reconnaît certaines roches comme vitrescibles, 1749.

Buffon constata rigoureusement, par des essais directs, que le granit et les principales roches cristallines sont *vitrescibles*. Il pensait que ces grandes masses « de *verres naturels* » avaient pu acquérir leur état cristallin à la suite d'un recuit suffisamment long[2].

Structure cristalline que prennent les silicates par un refroidissement convenable.

Dès le commencement du siècle, sir James Hall, tout en étudiant, comme nous l'avons vu plus haut, l'influence combinée de

alors brilleront à nos yeux les rapports frappants qui existent entre les produits de la nature et ceux de l'art. Bien que l'auteur inépuisable des choses ait en son pouvoir des moyens divers d'effectuer ce qu'il veut, il se plaît néanmoins dans la constance au milieu de la variété de ses œuvres; et c'est déjà un grand pas vers la connaissance des choses que d'avoir trouvé seulement un moyen de les produire. — La nature n'est qu'un art plus en grand. » (*Protogæa;* traduction française précitée, § 9.) — « Les lois générales du monde physique n'agissent-elles pas dans nos laboratoires de même que dans les souterrains des montagnes ? » (Saussure. *Voyage dans les Alpes*, § 750.)

[1] L'expérience par laquelle Lemery chercha à imiter, en 1700, les phénomènes des volcans, en chauffant un mélange de fer et de soufre dans de la terre humide, reposait sur une fausse ressemblance, et ne conduisit qu'à une déduction tout à fait erronée; elle fit cependant assez de sensation pour devoir être mentionnée ici. (*Mémoires de l'Académie des sciences*, 1700.)

[2] *Histoire naturelle des minéraux, substances vitreuses, du granit.* « Ces substances vitreuses, dit-il, se fondent sans addition, au même degré de feu que nos verres factices. » Buffon avait, en outre, bien remarqué que le feldspath est beaucoup plus fusible que les deux autres éléments du granit. Leibnitz, il est vrai, avait déjà dit que la terre et les pierres soumises au feu donnent du verre; que le verre n'est que la base de la terre (*Protogæa*, § 3); mais il confondait ici toutes les roches, y compris le calcaire, le silex et le sable; et il y a loin de cet aperçu vague aux expériences précises que fit Buffon. J'ai mentionné plus haut (chapitre IV, § 1) celles de Spallanzani sur ce sujet. On peut en outre rappeler les expériences qu'exécuta Buffon sur le refroidissement de sphères de diverses dimensions, les unes en métal, les autres en grès ou en marbre, pour se représenter les conditions du refroidissement du globe terrestre. Newton avait déjà annoncé l'intention d'entreprendre des expériences de ce genre. M. G. Bischof a fait, dans un but semblable, une série intéressante d'observations sur la fusion et le refroidissement de sphères en basalte. (*Die Wärmelehre des innern Erdkörpers*, 1837, p. 443 à 505.)

la chaleur et de la pression sur le calcaire, entreprit de nombreuses expériences dans le but de savoir si, comme le prétendaient les adversaires de Hutton, les roches formées par fusion auraient dû rester vitreuses[1]. Il reconnut, ainsi que l'avait d'ailleurs pressenti Buffon, que certains silicates, au lieu de se présenter à l'état vitreux après leur consolidation, peuvent, à la faveur d'un refroidissement lent, devenir cristallins et prendre un aspect pierreux, semblable à celui des roches éruptives. Ces expériences, qui furent continuées par d'autres savants, apprirent en outre qu'une masse vitreuse peut même cristalliser sans passer par la fusion[2].

Examen des cristaux obtenus accidentellement dans les ateliers métallurgiques.

Utilité de l'étude des produits métallurgiques pour la géologie.

C'est ainsi qu'on fut naturellement amené à examiner les silicates qui sortent en abondance des fourneaux métallurgiques à l'état de fusion.

M. Haussmann appelle l'attention sur ce sujet dès 1816.

Conformément à l'idée de Leibnitz, M. le professeur Haussmann utilisa, dès 1816, pour l'intelligence des phénomènes géologiques, ce genre d'observations auquel il n'a cessé, pendant toute sa longue carrière, d'apporter d'importants tributs[3].

[1] Les expériences de sir James Hall sur la consolidation des basaltes et des roches fondues datent de 1800. (*Edinb. Phil. trans.* V et VI.)

[2] Les expériences de Hall ont été continuées, sur une plus grande échelle, par Gregory Watt. (*London Phil. trans.* 1804, et *Bibliothèque britannique*, n° 256.) En même temps M. Dartigues publiait ses expériences sur la dévitrification du verre. (*Journal de pharmacie*, LIX; *Journal de physique*, LX; *Annales de chimie*, t. L.) D'autres recherches ont été faites sur ce sujet vers la même époque : Fleuriau de Bellevue, *Sur l'action du feu dans les volcans*, t. LX, 1805; de Drée, *Nouveau genre de liquéfaction ignée*. (*Journal des mines*, XXIV, 1808; *Mémoires de l'Académie des sciences*, 1808.) Il convient, en outre, de mentionner les observations bien antérieures de James Keir et de Sam. More. (*London Phil. trans.* 1776 et 1782.) Je rappellerai aussi les observations récentes, sur la dévitrification, de M. Dumas et de M. Pelouze (*Comptes rendus*, 1845, 1855 et 1856), et celles de MM. Mitscherlich, Gustave Rose, Charles Deville et Delesse, sur la fusion des roches.

[3] *Bemerkungen über die Benutzung metallurgischer Erfahrungen bei geologischen Forschungen* (*Göttingische gel. Anzeigen*, 1816, p. 489.) Ce premier travail a été suivi de nombreux et importants mémoires sur le même sujet. Koch avait déjà décrit, en 1809, quelques cristaux d'usine, entre autres l'oxyde de zinc. Depuis longtemps on avait aussi remarqué le graphite qui se sépare de la fonte.

M. Mitscherlich découvre des espèces minérales dans des scories, 1823.

Bientôt M. Mitscherlich reconnut que le péridot, le pyroxène et d'autres espèces minérales cristallisent accidentellement dans des scories d'usine [1]. C'était le digne complément de son travail sur la relation entre la forme des cristaux et leur composition chimique, qui venait de marquer d'une manière si éclatante dans la minéralogie et la chimie.

Nombreuses observations sur le même sujet faites depuis lors.

Depuis lors, les scories métallurgiques ont été examinées avec soin à ce point de vue intéressant par MM. Berthier, Vivian, Bredberg, Sefström, Zinken, Wœhler, Kersten, Plattner, Rammelsberg, F. Sandberger, Percy, Miller et d'autres savants. M. le professeur de Leonhard a récemment publié un ouvrage où tous les faits connus sur ce sujet sont habilement résumés et rapprochés [2].

Parmi des sublimés de fourneaux, on signale le feldspath.

Les produits obtenus dans les usines par la cristallisation ou la liquation d'une masse fondue ne sont pas les seuls qui soient de nature à intéresser le géologue. Il en est, comme la galène, l'oxyde de zinc, la blende, qui s'isolent des foyers, soit par une sublimation immédiate, soit par la volatilisation d'une partie ou de la totalité de leurs éléments. Parmi ces résultats de condensation, le plus remarquable est le feldspath, qui a été recueilli à diverses reprises dans la partie supérieure des fourneaux à cuivre du Mansfeld, dans des cadmies, et dont l'existence, d'abord simplement soupçonnée, a été mise hors de doute par l'analyse de M. Kersten [3]. La formation de ce minéral important, par voie de vapeur, mérite d'autant plus d'attention, que, malgré beaucoup de tentatives, on n'a pas encore pu l'obtenir cristallisé par une fusion directe.

Expériences synthétiques par fusion simple ou de mélanges divers.

Expériences synthétiques par voie sèche.

La vue des cristaux qui se forment accidentellement dans les

[1] *Abhandlungen der K. Academie der Wissenschaften zu Berlin*, 1823, p. 25. *Annales de chimie et de physique*, t. XXIV, p. 335.

[2] Von Leonhard, *Hüttenerzeugnisse*, 1858. M. le docteur Gurlt a aussi publié un résumé général : *Pyrogennete künstliche Mineralien*, 1857, traduit en français par M. le professeur Dewalque. L'idocrase et la gehlénite sont du nombre des produits les plus fréquents.

[3] Kersten, *Poggendorffs Annalen*, t. XXXIII, p. 336, et t. XXXIV, p. 531.

usines a nécessairement conduit à faire des expériences directes de voie sèche par différents procédés[1].

Les premiers résultats sont dus à M. Berthier, 1823.

C'est à M. Berthier que l'on doit les premières tentatives dans cette direction intéressante. En fondant la silice avec différentes bases en proportions définies, il a obtenu, dès 1823, des combinaisons cristallines identiques à celles de la nature, notamment le pyroxène[2].

Ebelmen obtient des minéraux infusibles par un procédé nouveau, de 1847 à 1851.

Plus tard, Ebelmen parvint, par un procédé très-ingénieux, qui lui appartient, à obtenir des combinaisons infusibles en cristaux parfaits. Ce procédé consiste à employer des dissolvants à l'état de fusion, et pouvant s'évaporer lentement à de très-hautes températures, tels que l'acide borique, les phosphates ou les carbonates alcalins. C'est ainsi qu'il a produit le corindon, les différentes sortes de spinelles, la cymophane, le péridot, la perowskite et d'autres espèces, en cristaux d'une netteté surprenante[3].

Procédé de MM. Henri Deville et Caron, 1858

La réaction mutuelle des fluorures métalliques volatils et de composés oxygénés, à des températures aussi très-élevées, constitue un autre procédé qui a fourni, dans ces derniers temps, à ses auteurs, MM. Henri Deville et Caron, de très-belles reproductions de minéraux infusibles, tels que le corindon coloré de diverses manières et la staurotide[4]. Les mêmes chimistes ont imaginé un procédé différent pour reproduire l'apatite[5].

Corindon de M. Gaudin, 1857.

C'est également par une volatilisation partielle que M. Gaudin a obtenu le rubis artificiel, en fondant à une très-haute température un mélange d'alun et de sulfate de potasse[6].

[1] On a cherché aussi à faciliter la cristallisation de diverses manières, en agissant sur de grandes masses qui se refroidissent très-lentement, et en y insufflant des gaz pour produire des géodes.

[2] *Annales de chimie et de physique*, t. XXIV, p. 365, 1823.

[3] *Ibid.* t. XXII, p. 221, et t. XXV, p. 279; *Annales des mines*, 5e série, t. II, p. 359.

[4] *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XLVI, p. 765, 1858.

[5] L'apatite et la wagnerite ont été obtenues par une sorte de distillation des phosphates dans les chlorures des mêmes métaux. (*Comptes rendus*, t. XLVII, p. 985, 1858.)

[6] *Ibid.* t. XLVI, p. 765, 1857. L'alumine fondue ou rubis, obtenue précédemment par le même auteur, était amorphe. (*Ibid.* t. V, p. 803, 1837.)

Diamant produit par M. Despretz.

M. Despretz a annoncé qu'il avait obtenu du diamant par divers procédés basés sur le transport et le dépôt lent du carbone par un courant électrique[1].

Fusion d'un mélange de sels par le procédé de M. Manross, 1858.

En fondant certains mélanges de sels et traitant le résidu par l'eau, M. Manross a imité la baryte sulfatée, l'apatite, le wolfram et d'autres minéraux[2].

Action du sel marin dans la formation des minéraux étudiée par M. Forchhammer, en 1854.

Le sel marin employé seul, comme fondant, a suffi à M. Forchhammer pour produire de l'apatite cristallisée, même en opérant sur des roches qui ne renferment que des indices de phosphates[3]. Si l'on réfléchit à l'énorme abondance avec laquelle le chlorure de sodium est répandu dans l'enveloppe liquide du globe, on ne peut guère douter que ce sel n'ait concouru à la cristallisation de certaines espèces, surtout à l'époque où l'eau n'était vraisemblablement pas encore condensée presque en totalité, comme aujourd'hui.

Et par M. Charles Deville, en 1858.

M. Charles Deville a récemment fait des essais dans cette même direction, en chauffant de l'argile ou du grès quartzeux, préalablement humecté de chlorure de sodium[4].

Expériences synthétiques à l'aide de vapeurs réagissant entre elles ou sur des corps fixes.

Sublimations ou réactions de vapeurs entre elles.

Par une simple sublimation, on peut imiter quelques espèces minérales, telles que l'arsenic, la galène et la sénarmontite[5]. Mais c'est surtout en faisant réagir certaines vapeurs entre elles, comme dans les ateliers métallurgiques, que l'on peut arriver à des résultats variés.

Formation du fer oligiste observée.

C'est ainsi qu'on obtient le peroxyde de fer cristallisé, comme le fer oligiste de la nature, en décomposant à chaud le perchlo-

[1] *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXXVII, p. 369, 1853.

[2] *Annalen der Chemie und Pharmacie*, t. LXXX, p. 348, 1852.

[3] *Poggendorffs Annalen*, t. LXXXI, p. 568, 1854. M. Forchhammer a même proposé ce moyen pour reconnaître dans les roches les phosphates, ainsi que certains métaux, lorsqu'ils ne s'y trouvent que par traces insensibles aux procédés ordinaires d'analyse.

[4] *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XLVII, p. 89, 1858.

[5] Je rappellerai aussi le soufre en octaèdres droits, obtenu par la condensation très-lente de la vapeur à une température peu élevée. (*Annales des mines*, 5e série, t. I, p. 121.)

rure de fer par la vapeur d'eau, ainsi que l'a fait Gay-Lussac. Cette réaction se produit parfois, comme l'a reconnu M. Mitscherlich, dans les fours de potiers où l'on projette du chlorure de sodium[1].

par Gay-Lussac et M. Mitscherlich.

J'ai essayé, en 1849, une réaction fondée sur le même principe, pour vérifier expérimentalement l'origine que j'avais antérieurement attribuée aux amas de minerai d'étain. Par la décomposition des bichlorures d'étain et de titane, j'ai obtenu l'oxyde d'étain cristallisé, avec l'éclat et la dureté de celui de la nature, mais isomorphe avec le titane oxydé connu sous le nom de brookite; j'ai d'ailleurs produit cette dernière espèce minérale elle-même[2].

Production des oxydes d'étain et de titane par M. Daubrée, 1849.

En amenant l'hydrogène sulfuré sur divers chlorures métalliques réduits à l'état de vapeur, M. Durocher a obtenu quelques-uns des principaux sulfures contenus dans les filons, par exemple le cuivre gris[3].

Production de sulfures par réaction de chlorures en vapeur et de l'hydrogène sulfuré : M. Durocher, 1851.

Au lieu de faire agir les vapeurs les unes sur les autres, on peut s'en servir pour attaquer des substances fixes et y développer des combinaisons nouvelles.

C'est d'après ce principe que j'ai le premier obtenu artificiellement l'apatite, ainsi que la topaze[4]. Plus tard, au moyen des chlorures de silicium et d'aluminium, j'ai produit des silicates et des aluminates cristallisés[5]. J'ai également imité l'oxyde rouge de manganèse ou hausmannite[6].

Première imitation de l'apatite, de la topaze et d'autres minéraux, par M. Daubrée, 1851.

[1] *Poggendorffs Annalen*, t. XV, p. 630. M. Nöggerath l'a aussi signalé comme produit d'un incendie dans la mine de sel de Wieliczka. Les fours où l'on fabriquait le carbonate de soude, à Framont (Vosges), en décomposant le chlorure de sodium par la pyrite de fer, ont produit de magnifiques enduits de fer oligiste cristallisé à la surface des briques.

[2] *Recherches sur la production artificielle de quelques espèces minérales cristallines, particulièrement de l'oxyde d'étain, de l'oxyde de titane et du quartz. Observations sur l'origine des filons titanifères des Alpes.* (*Annales des mines*, 4e série, t. XVI, 1849.)

[3] *Comptes rendus*, t. XXXII, p. 823.

[4] *Annales des mines*, 4e série, t. XIX, p. 669, 1851.

[5] *Comptes rendus*, t. XXXV, p. 261, 1852.

[6] *Annales des mines*, 5e série, t. I, 1852.

Autres expériences sur l'action de gaz ou de vapeurs sur les roches.

Il convient encore de mentionner ici la production de la dolomie par M. Durocher, sous l'action de vapeurs chlorurées et magnésiennes, en présence du calcaire[1]; les expériences de M. Charles Deville, sur l'altération des roches silicatées par l'hydrogène sulfuré et l'eau[2]; ainsi que celles de MM. Rogers, sur la manière dont l'eau chargée d'acide carbonique décompose, même à froid, les principaux silicates naturels.

La vapeur d'eau, à une très-haute température, attaque les silicates.

On avait remarqué qu'il suffit de la vapeur d'eau, si elle est douée d'une haute température, pour attaquer de nombreux silicates[3]. Ainsi, des briques chauffées à la température de la fusion de la fonte abandonnent, d'après M. Jeffreys, à un courant de vapeur d'eau, de la silice, qui va se condenser sous forme neigeuse[4]. C'est encore par une action du même genre que l'eau corrode les émaux dans les fours à porcelaine[5].

Voie humide.

Les actions qui viennent d'être signalées, de la vapeur d'eau sur les chlorures et sur les silicates, forment comme un intermédiaire entre la voie sèche et la voie humide. Il nous reste à résumer les résultats de cette dernière.

Actions lentes utilisées par M. Becquerel, pour produire des combinaisons insolubles, 1823.

M. Becquerel a depuis longtemps montré l'influence des actions lentes, aidées d'une électricité à très-faible tension, pour précipiter des combinaisons insolubles qui imitent celles de la nature[6].

Production de l'hydrophane par Ebelmen.

C'est aussi par la décomposition lente de l'éther silicique qu'Ebelmen a produit la silice hydratée en masses solides, voisines de l'hyalite et de l'hydrophane[7].

[1] *Comptes rendus*, t. XXXIII, p. 64, 1851.

[2] *Ibid.* t. XXXV, p. 261, 1852.

[3] D'après Turner, le verre se recouvre d'une croûte de silice opaque, ne renfermant plus d'alcali, et ayant quelquefois une disposition stalactiforme. (*Annales des mines*, 3e série, t. VII, p. 448, 1835.)

[4] Jeffreys *Report of the british association*, 1840. (*Bibliothèque britannique*, t. VIII, p. 441.)

[5] M. Alexandre Brongniart et M. Regnault l'ont constaté à Sèvres.

[6] *Annales de chimie et de physique*, t. XXXII, p. 244, 1823.

[7] *Annales des mines*, 4e série, t. VIII, p. 149; *Comptes rendus*, t. XXI, p. 527. M. le

M. Gustave Rose a habilement analysé les conditions de la précipitation du carbonate de chaux à l'état d'arragonite. MM. Bischof et Sterry Hunt ont fait diverses expériences : le premier, pour contrôler ses idées sur la formation des minéraux ; le second, à l'appui de sa manière de considérer l'origine des roches magnésiennes[1]. M. Charles Deville a étudié comment l'eau, avec le seul aide de l'acide carbonique et sans le secours de la pression, peut concourir à la formation des dolomies[2]. Les réactions produites dans la fabrication des chaux hydrauliques et des ciments ont été pour M. Kuhlmann le point de départ de déductions ingénieuses relatives à la géologie[3]. On peut encore mentionner l'examen de l'action des alcalis sur les roches, par M. Delesse[4].

Autres expériences sous la pression ordinaire : Gustave Rose, Bischof, S. Hunt, Ch. Deville, Kuhlmann, Delesse.

C'est surtout à de hautes températures et sous pression que l'on est parvenu à imiter, dans l'eau, les substances qui intéressent au plus haut degré l'histoire du globe.

Expériences sous pression.

Hall[5] et M. Cagniard-Latour[6] avaient depuis longtemps reconnu que, dans ces conditions, les matières végétales se comportent d'une manière toute particulière. Toutefois l'emploi de l'eau sous pression, pour la production artificielle des minéraux, n'a été réellement inauguré que par l'importante expérience de M. Haidinger et de M. de Morlot, sur la formation de la dolomie[7]. Au lieu de former la dolomie, comme ces savants, en faisant réagir le sulfate de magnésie sur le carbonate de chaux, MM. Favre et Marignac se sont plus tard servis, pour arriver au même résultat, de chlorure de magnésium[8].

Expériences sur la production de la dolomie : Haidinger, de Morlot, Favre, Marignac.

docteur Gergens a également obtenu une sorte d'opale commune en décomposant très-lentement le silicate de potasse (verre soluble) par de l'acide carbonique en dissolution dans l'eau. (*Leonhards Jahrbuch*, p. 807, 1858.)

[1] *Bibliothèque de Genève*, 268, 1857.

[2] *Comptes rendus*, t. XLVII, p. 90, 1858.

[3] *Ibid.* t. XII, p. 852 ; t. XXXV, p. 739.

[4] *Bulletin de la Société géologique*, 2e série, t. XI, p. 127.

[5] Hall obtenait une sorte de houille par la voie sèche.

[6] *Comptes rendus de l'Académie*, t. XXXII, p. 295, 1857.

[7] Von Morlot, *Ueber Dolomit und seine künstliche Darstellung aus Kalkstein.* (*Mémoires de l'académie de Vienne*, t. I, p. 305, 1847.)

[8] *Bibliothèque de Genève*, mai 1849.

Formation des gîtes métallifères concrétionnés, par M. de Sénarmont, de 1849 à 1851.

M. de Sénarmont a entrepris une longue série d'expériences qui ont jeté une vive lumière sur des phénomènes très-importants[1]. En opérant à l'aide de l'eau à des températures de 130 à 300 degrés, il est parvenu à produire, à l'état cristallisé, les principaux minéraux qui caractérisent les filons métallifères, entre autres le quartz[2], le fer spathique, les carbonates de manganèse et de zinc, la baryte sulfatée, l'antimoine sulfuré, le mispickel, l'argent rouge. Pour comprendre aujourd'hui toute l'importance du problème qui a été ainsi résolu par ce savant, il faut se rappeler que jusqu'alors on n'avait pu imiter la plupart des minéraux des filons. Or les espèces les plus caractéristiques de ces gisements, au nombre de plus de trente, se trouvaient reproduites par un même procédé, conforme à celui que faisait présupposer l'observation, et à l'aide des éléments les plus répandus dans les sources thermales. Pour la première fois on a vu en géologie, par ce mémorable travail, comment une induction relative à tout un ordre de faits peut être démontrée par la synthèse expérimentale.

On doit également à M. de Sénarmont la découverte de ce fait, que la seule action de l'eau peut, avec l'aide d'une température élevée, isoler les bases de certains sels. C'est ainsi que l'oxyde de fer anhydre et l'alumine cristallisée ou corindon ont été produits par la décomposition de dissolutions de chlorure de fer et de chlorure d'aluminium. La brochantite (sous-sulfate de cuivre) et l'azurite ont été récemment obtenues par le même procédé.

Transformation des végétaux en houille

En soumettant du bois dans de l'eau à une température d'environ 300 degrés, j'ai produit une véritable anthracite[3]. A une

[1] *Expériences sur la formation artificielle par voie humide de quelques espèces minérales qui ont pu se former dans les sources thermales, sous l'action combinée de la chaleur et de la pression.* (*Annales de chimie et de physique*, t. XXVIII, p. 693, 1849.) *Expériences sur la formation des minéraux par voie humide dans les gîtes métallifères concrétionnés.* (*Ibid.* t. XXXII, 1851.)

[2] M. Schafhaütl a annoncé avoir obtenu de la silice cristallisée dans la marmite de Papin. (*Anzeigen*, 1845, p. 557.)

[3] *Annales des mines*, 5e série, t. XII, p. 305, 1857.

température moins élevée, M. Baroulier a obtenu, au moyen de végétaux renfermés dans de l'argile humide, une imitation de la houille[1].

et en anthracite : M. Daubrée et M. Baroulier.

Jusqu'alors la voie humide n'avait encore pu produire de silicates anhydres; je suis arrivé à ce résultat par une série d'expériences, dont je donnerai les principaux résultats dans la troisième partie de ce travail[2].

Production des silicates anhydres par la voie humide, par M. Daubrée. 1857.

Au reste, la nature fait elle-même encore chaque jour des expériences, si l'on peut dire, du genre de celles que nous n'exécutons qu'avec tant de difficultés, et elle y emploie probablement des procédés analogues à ceux dont elle s'est servie depuis les temps les plus reculés. Malheureusement ces réactions se passent dans des régions où nous ne pouvons guère pénétrer. Cependant il est des cas, rares il est vrai, où l'on peut être témoin de la formation des minéraux contemporains. C'est ainsi qu'il a suffi de descendre de quelques mètres sous le sol de Plombières et d'entrer dans ces masses imbibées, depuis des siècles, d'eau thermale, pour y découvrir le cuivre sulfuré en cristaux identiques à ceux du Cornouailles, et toute une série de zéolithes, disposées comme dans les roches basaltiques[3], et l'on ferait sans doute bien d'autres découvertes, si l'on pouvait pénétrer plus profondément dans les canaux par lesquels s'élèvent les sources thermales.

La formation des minéraux des filons et des roches métamorphiques qu'opère journellement la nature est rarement visible.

Quand on arrive à surprendre ainsi la nature, après le premier plaisir de lui avoir ravi un de ses secrets, on éprouve un sentiment d'humilité en voyant au prix de quelles difficultés il est possible

[1] *Comptes rendus*, t. XLVI, p. 376, 1858.

[2] *Observations sur le métamorphisme et recherches expérimentales sur quelques-uns des agents qui ont pu le produire.* (*Annales des mines*, 5e série, t. XII, p. 289, 1857. *Bulletin de la Société géologique*, 2e série, t. XV, p. 250.)

[3] *Mémoire sur la relation des sources thermales de Plombières avec les filons métallifères, et sur la formation contemporaine des zéolithes.* (*Annales des mines*, 5e série, t. XIII, p. 227, 1858. *Bulletin de la Société géologique*, 2e série, t. XVI, p. 562.) La formation contemporaine de la pyrite de fer, qui est un minéral si répandu, n'a été vue qu'assez rarement; annoncée d'abord par M. Longchamp, à Chaudesaigues, elle a été également rencontrée par M. Bischof à Brohl, et par M. Bunsen, en Islande.

d'arriver à reproduire quelques-uns de ses phénomènes les plus simples. Cependant les résultats déjà acquis montrent qu'il n'y a pas lieu de se décourager, et que l'on peut espérer de parvenir à imiter bien des minéraux sans l'intervention des siècles.

DEUXIÈME PARTIE.

EXPOSÉ DES FAITS ACQUIS DONT L'ENSEMBLE CONSTITUE LE MÉTAMORPHISME.

La variété des faits que j'ai à exposer m'engage à les grouper dans cinq chapitres. J'examinerai d'abord le *métamorphisme de juxtaposition;* en deuxième lieu, le *métamorphisme régional.* Je passerai ensuite en revue le *métamorphisme de structure*, puis les phénomènes propres au gisement de la *dolomie*, du *sel gemme*, du *gypse*, du *soufre* et des *dépôts bitumineux;* enfin la *relation générale des gîtes métallifères et des sources thermales avec le métamorphisme.*

Les observations relatives au *gneiss ancien*, dont l'origine est ambiguë, sont réservées pour la troisième partie, par laquelle je termine ce travail.

Cet exposé sera très-bref; car il a pour objet des faits bien connus, et qu'il faut rappeler seulement pour qu'on ait présentes à l'esprit les conditions auxquelles doit satisfaire l'explication théorique [1].

CHAPITRE PREMIER.

MÉTAMORPHISME DE JUXTAPOSITION [2].

Métamorphisme de juxtaposition.

Quand une roche a fait éruption des profondeurs, les couches qu'elle traverse ont en général été modifiées dans son voisinage.

[1] Les exemples connus formeraient un traité de géologie descriptive tout entier; je ne les détaillerai pas, et me bornerai à de simples énoncés : je renverrai, pour ce qui les concerne, aux excellents ouvrages de géologie générale, particulièrement à ceux de MM. Naumann, Studer et Lyell.

[2] Je crois devoir me servir de cette dénomination, au lieu de celle de mé-

Quelquefois cette modification des roches encaissantes est réduite à une lisière très-mince, de quelques millimètres, et les changements produits sur cette faible épaisseur sont même peu prononcés[1]. Dans d'autres cas, et particulièrement quand la roche qui a percé est de nature granitique, l'étendue de la zone modifiée, aussi bien que les changements plus complets qui y ont été opérés, dénote une action beaucoup plus énergique. Variations d'étendue de la zone modifiée.

Non-seulement l'étendue de la zone modifiée varie suivant la nature de la roche éruptive, mais, pour une même roche, et dans une même contrée, cette étendue présente de grandes différences[2]. Près du granit, elle est souvent de quelques centaines de mètres, et va exceptionnellement à trois mille mètres; par exemple, aux environs de Christiania, cette bordure est moyennement de trois cent soixante mètres; dans les Pyrénées, elle atteint jusqu'à quinze cents mètres avec des effets parfaitement caractérisés[3]. On remarque que la transformation s'est en général propagée plus loin, entre les angles rentrants formés par la roche éruptive, que vis-à-vis Cette étendue varie pour une même roche.

tamorphisme de *contact*, que l'on emploie ordinairement, parce que les modifications auxquelles elle s'applique s'étendent quelquefois beaucoup au delà du contact des roches. Le mot *local* ne paraît, d'ailleurs, pas assez caractéristique.

[1] Comme exemple, je me bornerai à citer beaucoup de filons de basalte qui coupent le terrain jurassique de l'Alpe du Wurtemberg. Le granit lui-même n'a pas toujours modifié le schiste, lors même qu'il a été assez fluide pour y être injecté en filons, comme dans les Vosges, près de Wesserling. (Ed. Collomb, *Bulletin de la Société géologique*, t. IV, p. 1446.)

[2] La craie du nord-est de l'Irlande n'est aucunement modifiée auprès de certains filons de trapp; elle est, au contraire, devenue cristalline près de ceux qui sont plus puissants : dans ce dernier cas, la modification s'étend rarement au delà de trois mètres. La même roche forme des filons dans l'île de Sky, en Écosse; le lias est modifié près de quelques-uns d'entre eux, tandis qu'il ne l'est nullement au contact d'autres, sans qu'on puisse se rendre compte de la cause de cette différence. (Oenhausen et von Dechen, *Karstens Archiv*, t. I, 2e série, p. 99.) Les roches du terrain de transition des Vosges, dans lesquelles le granit a pénétré en filons, présentent des différences bien plus grandes encore : tantôt la modification est insensible, comme dans la vallée de Wesserling; tantôt elle est fortement prononcée, comme à Andlau et à Barr.

[3] Durocher, mémoire déjà cité.

des parties saillantes (Champ-du-Feu dans les Vosges[1], environs de Christiania).

Nature très-variée des modifications subies par les roches encaissantes.

Quant à la nature des modifications subies par les roches encaissantes, elles sont tellement variées, qu'il est difficile de les résumer[2].

Quelquefois il ne s'est fait qu'un nouvel arrangement moléculaire : ainsi le calcaire est devenu saccharoïde, comme le marbre statuaire; ailleurs, ce sont des grès qui sont changés en quartzite (île de Sky).

Les combustibles minéraux se sont généralement modifiés, en perdant une partie de leurs éléments constitutifs[3]. C'est ainsi que le lignite a été changé en houille, en anthracite et parfois même en graphite (graphite exploité à Omenak au Groënland, dans le terrain tertiaire, terrain où il est également connu à Java). La houille est quelquefois passée également à l'un de ces deux derniers états (graphite d'Écosse, graphite et anthracite de Worcester, près Boston, États-Unis). Plus rarement la houille et le lignite se sont transformés en une sorte de coke[4]. Du bitume accidentellement isolé de ces combustibles s'est fixé dans des roches plus ou moins voisines (Lobsann, dans le Bas-Rhin, Hering, en Tyrol).

Le plus souvent il s'est développé de nouvelles combinaisons cristallines, soit avec les éléments qui préexistaient dans la roche, soit avec le concours d'éléments nouveaux qui y ont été intro-

[1] Le terrain de transition est modifié d'une manière beaucoup plus complète, et sur plus d'étendue, dans le haut de la vallée de Barr, que dans les vallées de Villé et d'Andlau; cela paraît résulter de ce qu'au lieu de border simplement le granit, il forme, dans la première localité, une longue bande qui est comme encastrée au milieu du granit et de la syénite. (*Description géologique du Bas Rhin*, p. 54.)

[2] Dans son travail sur le métamorphisme de contact, M. Delesse en a rapproché et examiné de nombreux exemples. (*Annales des mines*, 5e série, t. XII, p. 89.)

[3] Ce qui n'a pas empêché qu'ils ont souvent acquis aussi de nouveaux minéraux comme les autres roches, par exemple, des zéolithes.

[4] Cette dernière transformation signalée près de roches trappéennes, par exemple dans le pays de Newcastle, n'a pas été observée jusqu'à présent à proximité de roches granitiques.

duits, soit enfin par l'élimination de quelques-uns de ceux qui s'y trouvaient[1].

Parmi les minéraux qui se sont le plus fréquemment formés dans les schistes argileux, on peut citer la mâcle ou chiastolite, la staurotide, le disthène, le mica qui est souvent en paillettes très-petites et appartient à deux espèces, les feldspaths orthose et anorthose, l'amphibole, qui est quelquefois assez abondant pour constituer un schiste amphibolique[2], la tourmaline[3], etc. Ces minéraux se rencontrent en général dans le voisinage du granit.

C'est principalement dans les calcaires qu'il s'est développé une grande variété de minéraux, parmi lesquels je mentionnerai le grenat, l'idocrase, l'amphibole, la wollastonite, l'épidote, la paranthine, le dipyre, la couzeranite, le mica magnésien, la gehlénite, le chondrodite, le spinelle[4], la serpentine, le talc, la chlorite, la terre verte, les zéolithes, certaines argiles, etc. Ces divers minéraux n'appartiennent d'ailleurs pas exclusivement à cette seule espèce de roches[5]. Ainsi les zéolithes se rencontrent non-seulement dans des calcaires, mais aussi dans les roches argileuses, les grès, quelquefois même les combustibles minéraux, lorsque ces roches ont été traversées par des éruptions trappéennes[6].

Dans le voisinage de roches éruptives de toute espèce, granit et autres, le quartz s'est souvent accumulé, soit en masses cristallines ou compactes, soit à l'état de jaspe[7]. Cette sorte d'ubi-

[1] C'est ce dernier cas qui paraît être arrivé dans les quartz grenus du Brésil.

[2] Environs de Christiania.

[3] Hornfels du Hartz.

[4] Monzoni, Somma, calcaire silurien de Sparta, aux États-Unis.

[5] Cependant quelques-uns, comme la wollastonite et la gehlénite, n'ont, jusqu'à présent, été trouvés que dans le calcaire.

[6] Calcaire tertiaire du conglomérat du Puy-de-la-Piquette, marnes des îles des Cyclopes, avec beaux cristaux d'analcime, schistes argileux d'Andreasberg, au Hartz, et de l'île d'Anglesey, grès tertiaire de Wildenstein, en Vétéravie, d'apparence vitrifiée. Des zéolithes se sont même développés aussi dans le granit, près des filons de basalte qui le traversent, par exemple dans l'île d'Arran (Boué, *Essai géologique sur l'Écosse*, p. 499), et à Haustein, dans la Forêt-Noire. (Schill. *Neues Jahrbuch*, 1857, p. 36.)

[7] Toscane, Grèce, Oural, etc.

quité appartient encore aux autres minéraux des filons métallifères, tels que les carbonates à base de chaux, de magnésie et de fer, la baryte sulfatée, le spath fluor, le fer oligiste[1].

Comme exemples de ces actions, dont les variétés sont sans nombre, je rappellerai la localité classique du Hartz, où le schiste avoisinant le granit (hornfels) prend du mica, du feldspath, de la tourmaline, de la chlorite, du grenat[2]; le Cornouailles, où l'on rencontre les effets du même genre[3]; les Vosges[4], les Pyrénées, la Bretagne[5], la Norwége, etc.

La roche transformée devient même parfois tout à fait semblable à une roche éruptive.

Quelquefois les roches qui avoisinent le granit ou la syénite sont tellement modifiées qu'elles prennent elles-mêmes tout à fait les caractères d'une roche éruptive. Ainsi, dans les Vosges, le schiste argileux passe par degrés à des pâtes de nature feldspathique, quelquefois porphyroïdes, et à des porphyres verts, parsemés d'anorthose et d'amphibole. Des faits semblables ont été observés dans beaucoup d'autres contrées[6].

La roche transformée est souvent devenue amygdaloïde; dans certaines régions de l'Allemagne elle porte le nom de schaalstein[7].

[1] Tantôt le quartz a été simplement isolé par la décomposition de silicates préexistants, comme on le verra dans la troisième partie; tantôt il résulte, comme les autres gangues des filons métallifères, d'un *apport* bien manifeste.

[2] D'après Hoffmann et Zincken.

[3] De la Bèche, *Geological report on Cornwall*, p. 267.

[4] Daubrée, *Description géologique du Bas-Rhin*, p. 32 et 52.

[5] D'après les mémoires précités de Palassou, Dufrénoy et de M. Durocher.

[6] Aux environs de Dublin, d'après la description de M. Scouler, les modifications seraient identiques à ce que l'on a observé dans les Vosges. (*Bulletin de la Société géologique de France*, 1re série, t. VII.) Beaucoup de porphyres verts pyroxéniques et de jaspes de l'Oural ont été attribués, par M. G. Rose, sir Roderick Murchison et M. Le Play, à un métamorphisme. (*Comptes rendus*, t. XIX, p. 857, *Reise nach Oural*, t. II, p. 185.)

[7] Ces roches amygdaloïdes passent fréquemment à des calcaires fossilifères, et prennent souvent elles-mêmes l'état de conglomérats (Steingraben dans les Vosges, Nassau, contrée de Brilon, en Westphalie, où elles sont associées au porphyre labradorique, Paimpol, en Bretagne, lac Supérieur et Nouvelle-Écosse). Certains spilites des Alpes et de l'Esterel sont considérés par M. Gras comme métamorphiques.

On sait en outre que la roche éruptive a souvent subi elle-même des modifications dans le voisinage des roches encaissantes[1].

Modification de la roche éruptive elle-même.

Les diverses transformations que je viens de signaler forment donc, autour des granits et des autres roches éruptives, comme des auréoles irrégulières. M. Élie de Beaumont a montré que, suivant que la roche est acide, c'est-à-dire avec excès d'acide silicique, ou qu'elle est basique, les gîtes métallifères en relation avec elle présentent deux types distincts. Il en est de même des auréoles métamorphiques dont il est question, et les observations de M. Delesse ont contribué à le faire reconnaître. Ainsi, d'une part, les zéolithes, qui ont si souvent pris naissance près des roches trappéennes, n'ont pas été signalées près d'épanchements de granit[2]. D'autre part, cette dernière roche, à l'exclusion de toute autre, a produit certains minéraux : tels sont les silicates alumineux connus sous le nom de mâcles et de staurotide, si communs dans les schistes argileux de la Bretagne. Des schistes micacés et feldspathiques enveloppent très-fréquemment les massifs de granit sur de grandes épaisseurs, dans les Pyrénées et ailleurs; on ne connaît rien d'analogue auprès des trapps.

Action différente des roches, selon qu'elles sont acides ou basiques.

CHAPITRE II.

MÉTAMORPHISME RÉGIONAL[3].

Je n'entends parler ici, je le répète, que des massifs schisteux dont l'origine métamorphique est clairement démontrée; je remets par conséquent à la troisième partie les gneiss anciens, micaschistes et autres roches subordonnées, qui sont inférieures aux terrains stratifiés fossilifères.

Métamorphisme régional.

[1] D'où le nom d'endomorphisme, proposé par M. Fournet. Souvent elle s'est imprégnée d'hydrosilicate magnésien, d'après M. Delesse.

[2] Durocher, mémoire précité, p. 607 et 614.

[3] Le nom de *métamorphisme régional* que je propose ici me paraît plus juste que celui de métamorphisme *normal*, et moins vague que la dénomination de métamorphisme *général*.

Des massifs considérables de roches sédimentaires, occupant des pays entiers, montrent souvent un métamorphisme prononcé, lors même qu'il est impossible de découvrir, au milieu de ces terrains, le moindre affleurement de roches éruptives[1].

La première phase est facile à reconnaître, dans les Ardennes, par exemple.

Ce fait est facile à constater dans les contrées où la modification n'est pas très-intense, telles que le pays de Galles, le Taunus ou les Ardennes. Dans les terrains siluriens et devoniens de ce dernier pays, par exemple, les roches argileuses sont en partie devenues schisteuses, et, sur de grandes étendues, la chlorite s'est développée entre leurs feuillets en innombrables cristaux microscopiques[2]; le feldspath s'y est glissé aussi quelquefois; de plus, une multitude de veines de quartz se sont isolées dans leur intérieur, et ces veines renferment souvent elles-mêmes les minéraux qui viennent d'être cités; enfin les grès se sont changés en quartzite[3]. Or il n'est guère permis d'admettre que des terrains stratifiés et fossilifères aient pu posséder originellement ces caractères minéralogiques; aussi chacun admet-il qu'ils doivent leur nature actuelle à une transformation subie depuis leur dépôt.

Elle sert de transition à une phase plus avancée, telle que la présentent les roches des Alpes centrales.

Mais quand le même phénomène se présente dans une phase plus avancée, il faut un examen plus attentif pour le constater, et même on n'arrive pas toujours à en acquérir la certitude, parce que le type primitif a été plus ou moins complétement effacé par les actions chimiques postérieures à la roche sédimentaire. Ainsi, dans les puissants massifs de roches cristallines des Alpes, on trouve, de même que dans les Ardennes, le schiste chloritique

[1] La différence dans la nature des combustibles minéraux, lignite, houille, anthracite, qui varient suivant les terrains, peut être considérée comme un premier exemple de métamorphisme opéré loin des roches éruptives et sur des substances peut-être plus *impressionnables* que les roches pierreuses. C'est ainsi qu'il n'y a que de l'anthracite dans les Alpes et dans les schistes talqueux de la basse Loire, et que le terrain éocène de la Toscane renferme une houille véritable (Monte-Bamboli).

[2] L'analyse a fait reconnaître à M. Sauvage l'existence de la chlorite même dans les variétés de phyllade où on ne la distingue pas. C'est dans les mêmes conditions que se trouve la séricite dans les schistes du Taunus.

[3] *Explication de la carte géologique de France*, t. I, p. 77. Durocher, mémoire précité, p. 603.

avec veines de quartz et souvent de chlorite; mais il y est, en général, mieux cristallisé (Zillerthal en Tyrol, Salzbourg). Il est associé à une série d'autres roches schisteuses cristallines de nature variée, qui alternent entre elles d'une manière irrégulière, notamment le schiste talqueux, les schistes verts[1], le schiste amphibolique et même certaines diorites schisteuses[2], le gneiss talqueux (décrit par Saussure sous le nom de granit veiné), le quartzite[3], des calcaires schisteux et souvent micacés, plus rarement des dolomies et des gypses parsemés également de minéraux variés (environs d'Airolo[4]). Cependant, malgré l'état éminemment cristallin de ces roches, la plupart des géologues qui ont décrit les Alpes, les ont considérées comme d'origine sédimentaire.

Preuves du métamorphisme de certains grands massifs cristallins.

La conclusion que certains terrains cristallins, et fort développés, tels que ceux des Alpes, sont métamorphiques, s'appuie sur plusieurs preuves, qui sont, du reste, à peu près du même ordre que celles qui démontrent le métamorphisme opéré dans le voisinage des roches éruptives. Je citerai principalement les suivantes :

1° Analogie de composition avec les roches sédimentaires.

1° L'analogie de composition qui unit certains groupes de roches cristallines aux roches sédimentaires est encore frappante, malgré les modifications que les premières paraissent avoir subies. On y trouve, en effet, comme dans les roches sédimen-

[1] Les roches nommées *schistes verts* par M. Studer, et qui sont certainement métamorphiques, ont été récemment très-bien étudiées par M. de Rath. Elles sont de composition très-variable; elles renferment souvent de l'oligoclase et de l'albite. (*Zeitschrift der deutschen geol. Gesellschaft*, t. IX, p. 211.)

[2] Nous avons déjà dit plus haut (page 58) que les diorites schisteuses de l'Oural sont généralement considérées comme métamorphiques.

[3] Les quartzites ont donné lieu à de très-nombreuses observations, parmi lesquelles je rappellerai celles de Macculoch pour l'Écosse (*Transactions of the geological society of London*, 1re série, t. IV, p. 264; 2e série, t. I, p. 53); celles de M. de Humboldt pour les Andes (*Cosmos*, t. I, p. 305); celles de M. Élie de Beaumont pour les Alpes.

[4] La serpentine elle-même, dans certains de ces gisements, dans les Alpes, l'Oural, les Alleghanys et ailleurs, paraît résulter du métamorphisme de différentes roches, amphiboliques et autres, ainsi que le montrent de très-nombreuses observations.

taires, des bancs de calcaire, de dolomie, de gypse, de roche quartzeuse ou quartzite, enfin des schistes chloritiques et talqueux qu'il serait souvent impossible de distinguer des roches de même nature qui sont subordonnées à des terrains siluriens bien caractérisés.

Je rappellerai aussi que la composition élémentaire de certains schistes argileux des terrains de transition est souvent très-sensiblement la même que celle du granit et du gneiss, ainsi que l'a remarqué M. Bischof.

2° Passage tout à fait insensible des roches cristallines aux roches fossilifères.

2° Une même contrée présente des passages, incontestablement graduels, des roches cristallines aux roches stratifiées fossilifères. Ces transitions insensibles, qui empêchent d'établir une ligne de démarcation entre les roches des deux catégories, et sur lesquelles Werner s'était fondé pour donner le nom de *terrain de transition* (Uebergangsgebirge) au groupe où elles sont le plus fréquentes, ont été trop souvent décrites pour qu'il soit nécessaire de s'étendre sur ce sujet[1].

Il est toutefois des localités, surtout dans les Alpes, où des roches cristallines sont enchâssées au milieu de roches sédimentaires peu modifiées.

3° Fossiles animaux conservés au milieu de roches cristallines.

3° On sait que la cristallisation qui s'est opérée à proximité des roches éruptives n'a pas toujours effacé la trace des fossiles : il en subsiste encore des vestiges bien distincts au milieu de roches parsemées de silicates cristallins. Il suffit de rappeler le calcaire silurien de la Norwége, avec fossiles, qui renferme, à Brevig, de la paranthine et du grenat, et, à Gjellebeck, de l'amphibole et de l'épi-

[1] Parmi les exemples sans nombre que l'on pourrait citer, il suffira de rappeler la Bretagne (*Explication de la carte géologique de France*, t. I, p. 234); la Saxe, où les transitions ont été si bien décrites par Naumann; les Alpes du Dauphiné, de la Tarantaise, de la Suisse, du Tyrol, de Salzbourg, de la Carinthie, d'après MM. Brochant, Élie de Beaumont, Sismonda, Gras, Lory, Studer, Escher, Lardy, Favre, Murchison, Credner et beaucoup d'autres; l'Oural, d'après Murchison et G. Rose; les États-Unis, d'après Lyell, etc. Les schistes verts forment, dans diverses régions des Alpes (Grisons, Piémont, etc.), le passage entre les roches évidemment sédimentaires et les roches cristallines. (Studer, *Physikalische Geographie*, t. I, p. 148.)

dote; le calcaire jurassique avec dipyre, d'Angoumert dans l'Ariége; les schistes de la Bretagne, si bien décrits par M. Boblaye, où les mêmes échantillons renferment à la fois des mâcles de plusieurs centimètres de longueur, avec des orthis, des spirifères et des calymènes; le calcaire blanc subcristallin, avec encrines, découvert par MM. Murchison et de Verneuil, dans l'Oural, sur les bords de la rivière Miask, au milieu d'une région de granit, de serpentine et de roches métamorphiques[1]; enfin, dans les Vosges, la roche amphibolique de Rothau, où les polypiers ont été remplacés, sans être déformés, par des cristaux d'amphibole, de grenat et d'axinite[2].

Or il en est de même pour les massifs de terrains cristallins qui nous occupent; depuis l'exemple cité par Brochant, MM. de Charpentier, Lardy et Studer ont découvert, dans le voisinage du Saint-Gothard, des bélemnites au milieu de schistes micacés avec grenat[3].

La possibilité d'une transformation paraît d'ailleurs démontrée par les blocs provenant de la Somma, où il y a toutes sortes de passages depuis le calcaire compacte de l'Apennin, avec pétoncles, jusqu'aux calcaires lamellaires et aux dolomies chargées de silicates cristallisés.

4° Empreintes végétales conservées dans les mêmes roches.

4° Dans les roches où l'état cristallin est encore plus prononcé, alors qu'on n'y aperçoit plus de formes animales, des débris de plantes se sont quelquefois conservés. On rencontre, par exemple, des empreintes végétales dans des roches feldspathiques et micacées, si cristallines, qu'on pourrait les prendre pour des roches éruptives, surtout si on les jugeait sur des échantillons isolés. Tels sont la grauwacke feldspathisée de Thann, les schistes de Bussang, dans les Vosges, la *pierre carrée* des bords de la Loire, fréquemment associée à l'anthracite, roches que l'on rapporte au terrain carbonifère inférieur ou au terrain anthraxifère.

[1] *Russia in Europa and the Oural mountains*, t. I, p. 246.

[2] *Annales des mines*, 5e série, t. XII, p. 318.

[3] Particulièrement au col de la Nufenen, près Airolo, M. de Charpentier avait déjà trouvé, en 1822, des bélemnites dans le calcaire prétendu primitif du col de Seigne. (*Cosmos*, t. I, p. 541.)

5° Vestiges charbonneux vraisemblablement d'origine organique.

Quand les formes végétales elles-mêmes ne s'y rencontrent plus, les roches schisteuses cristallines qui nous occupent renferment souvent encore des combinaisons charbonneuses, qui, selon toute probabilité, sont d'origine organique. C'est ainsi que les schistes micacés d'Airolo, parsemés de grenats et de longs prismes d'amphibole, contiennent encore, d'après l'essai que j'en ai fait, jusqu'à 5 p. o/o de carbone[1] : il en est de même de beaucoup de schistes ardoisiers[2].

Le métamorphisme de juxtaposition et le métamorphisme régional se distinguent surtout par leur étendue.

Il résulte de tout ce qui précède qu'il serait difficile d'établir une distinction nette entre le métamorphisme de juxtaposition et le métamorphisme régional, en se fondant seulement sur les caractères minéralogiques : les deux phénomènes diffèrent surtout par leur étendue.

Les roches schisteuses cristallines se rencontrent principalement dans les terrains les plus anciens.

C'est principalement dans les étages inférieurs de la série des terrains stratifiés que les effets du métamorphisme régional sont remarquables.

Terrains paléozoïques modifiés sur toute la longueur de l'Oural.

Un magnifique exemple de la transformation des terrains paléozoïques se rencontre dans la chaîne de l'Oural. L'origine sédimentaire et l'âge des schistes cristallins qui la composent ont été, en effet, mis hors de doute dans le beau travail de MM. Murchison, de Verneuil et Keyserling[3]. Les terrains siluriens, très-faiblement consolidés sur une partie de la Russie, se transforment dans la chaîne en schistes cristallins, qui ont conservé çà et là, comme pour attester leur origine, des lambeaux de roches fossilifères. Il en est de même des roches du terrain carbonifère : les calcaires blancs et tendres de Moscou se retrouvent dans l'Oural avec les mêmes fossiles (productus gigas et spirifer mosquensis), mais sous la forme de calcaires durs, foncés et cristallins.

Le métamorphisme

Cependant le métamorphisme régional n'est pas exclusivement

[1] Après avoir enlevé par un acide les carbonates de chaux, on a dosé le carbone par l'oxyde de cuivre, comme dans les analyses organiques.

[2] On peut même croire que la matière bitumineuse, constatée par M. Delesse dans la protogyne du Mont-Blanc, est d'origine organique.

[3] *Russia*, t. I, p. 402, 438 et 465.

restreint aux étages les plus anciens, et, d'un autre côté, il ne leur appartient pas nécessairement. Ainsi, d'une part, on trouve des schistes devenus cristallins jusque dans les couches à bélemnites, et même jusque dans le terrain nummulitique (comme dans les Grisons[1]). D'un autre côté, certains dépôts siluriens sont à peine modifiés, même dans leurs couches inférieures, ainsi qu'on le voit en Russie, en Suède, aux États-Unis[2].

n'est pas en relation constante avec l'ancienneté du terrain.

L'état si remarquablement cristallin de beaucoup de terrains paléozoïques ne doit donc pas être attribué exclusivement, ainsi qu'on l'a prétendu, à certaine condition générale qu'aurait présentée le globe à l'époque de leur dépôt, mais bien à des actions particulières qui ont affecté certaines régions préférablement à d'autres.

CHAPITRE III.

MÉTAMORPHISME DE STRUCTURE.

Beaucoup de massifs de roche se laissent diviser plus ou moins nettement en feuillets parallèles[3]. Ces feuillets ne sont pas un clivage de cristallisation; ils ne sont pas dus non plus à la stratification.

Caractères des feuillets; leur relation avec la stratification.

Le plan des feuillets est fréquemment oblique à celui des couches. Cependant il y a des contrées où la disposition transversale est exceptionnelle, et où les feuillets sont en général parallèles à la stratification[4].

Cette structure feuilletée est surtout développée dans les schistes

La structure feuilletée

[1] D'après sir R. Murchison, ces roches se rapprochent même du gneiss. (*Geol. quart. journ.* t. V, 211, 1848.)

[2] D'après les observations toutes récentes de sir Roderick Murchison, le métamorphisme a joué, dans la constitution du terrain silurien de l'Écosse, un rôle d'une importance qu'on ne soupçonnait pas.

[3] Souvent le joint ne se montre pas plus dans la roche que le clivage ne s'aperçoit dans les cristaux avant qu'on l'ait fait naître par le choc; il est en quelque sorte latent, ainsi qu'on le reconnaît dans les carrières d'ardoises.

[4] Ce parallélisme habituel a été remarqué au Hartz, en Saxe, en Bretagne, en Écosse, en Devonshire et dans le système du Rhin, par MM. Haussmann, Naumann, Durocher, Macculoch, de la Bêche, Baur et de Dechen.

n'est pas exclusivement développée dans les roches argileuses.

argileux ou phyllades; mais elle n'en est pas l'apanage exclusif et se poursuit dans des roches de nature différente, telles que les quartzites, les grès, les calcaires, surtout lorsque ceux-ci sont impurs.

Effets de déformation et d'étirement observés dans les roches schisteuses.

Diverses circonstances montrent que les roches feuilletées ont été soumises à des actions mécaniques, principalement à des pressions énergiques qui y ont produit des effets indélébiles. La plupart des fossiles que renfermaient ces roches ont été refoulés et étirés d'une manière très-caractéristique.

Elles ont probablement acquis leur structure feuilletée sous l'influence de pressions et de glissements.

C'est aux glissements qui sont résultés de ces pressions que la structure feuilletée paraît devoir son origine, comme d'ailleurs le confirme l'expérience que nous signalerons bientôt.

Autres divisions des roches qui paraissent résulter des mêmes pressions.

Certaines particularités de structure, moins prononcées que la schistosité ou le clivage, proviennent sans doute aussi d'actions mécaniques. Tels sont les *joints secondaires* connus de ceux qui travaillent les ardoises[1], la structure fibreuse qui résulte comme d'un plissement des feuillets[2], la structure dite pseudo-régulière, fréquente dans les quartzites et dans la houille. Ces divers modes de division seraient donc à signaler aussi comme le résultat d'un métamorphisme de l'espèce qui nous occupe.

La structure feuilletée ne se trouve que dans les régions disloquées.

La structure schisteuse anormale, ou, en d'autres termes, la structure feuilletée, qui ne provient pas de la stratification par dépôt, quoique très-fréquente dans les terrains anciens, ne s'y trouve pas toujours, et ne leur est pas exclusivement propre. D'une part, on ne rencontre pas de véritables phyllades dans les couches siluriennes de la Suède, de la Russie ou des États-Unis, qui ont conservé leur horizontalité première, et qui ont été mentionnées plus haut comme n'étant généralement pas métamorphisées; d'autre

[1] Le principal de ces joints secondaires est nommé *longrain* par les ardoisiers des Ardennes.

[2] La structure bacillaire de certains calcaires des Alpes, tels que celui de Klam, en Tyrol, en est un exemple. (Favre, *Géologie du Tyrol allemand*, Bibliothèque de Genève, 1849.) M. de la Bêche a donné des exemples de ces divisions dans son *Geological report on Cornwall*, p. 271.

part, des schistes propres à être exploités comme ardoises sont connus dans des terrains plus récents qui ont été disloqués, comme dans le terrain crétacé des Pyrénées et de la Terre-de-Feu[1], et dans le terrain nummulitique de la Suisse, aux environs de Glaris. Ainsi l'origine de la structure feuilletée, de même que l'état métamorphique, paraît se lier essentiellement à l'existence de dislocations.

CHAPITRE IV.

DOLOMIE, GYPSE, SEL GEMME, SOUFRE ET DÉPÔTS BITUMINEUX, DANS LEURS RAPPORTS AVEC LE MÉTAMORPHISME.

Dolomies d'origine épigène.

On sait que certaines dolomies résultent d'une transformation du calcaire[2]. Cette épigénie peut s'expliquer, ainsi que l'ont confirmé les expériences synthétiques qui ont été faites sur ce sujet, par la réaction de combinaisons magnésiennes sur le carbonate de chaux. Rien ne prouve, d'ailleurs, que la transformation en dolomie se soit toujours produite sous l'influence des mêmes agents, et que la dolomie du Campo-Longo, par exemple, avec ses tourmalines, ses corindons et ses minéraux variés, soit à assimiler à la dolomie d'autres régions des Alpes[3] et de Nice, ou à celle qui avoisine les gîtes de calamine de la Belgique.

Dolomies en couches régulières subordonnées aux terrains stratifiés.

Mais il existe des dolomies, et c'est le cas du plus grand nombre, qui sont disposées par couches régulières, souvent horizontales, constituant des horizons géognostiques très-étendus. Quand elles renferment des vestiges de coquilles, le test en a disparu; elles sont souvent cristallines et criblées de cavités, de manière à rappeler une substitution. Il est possible que ces dernières dolomies aient été précipitées directement[4]; mais, à raison de la disparition

[1] D'après M. Darwin.

[2] Au simple exposé des faits j'ajouterai, dans ces trois derniers chapitres, quelques considérations théoriques; cela me dispensera de revenir sur ces phénomènes dans la troisième partie.

[3] Voir notamment les mémoires de M. Studer et la *Physikalische Geographie* du même auteur, t. I, p. 146.

[4] Par des réactions sur lesquelles M. de Sénarmont et M. Forchhammer ont fixé

des coquilles, il est difficile de ne pas admettre, avec M. Élie de Beaumont, que ce second cas se rapproche du premier, par la réaction qu'aurait exercée sur la matière précipitée le milieu où s'est opérée la précipitation, réaction telle que le carbonate de chaux aurait disparu. On remarque en effet que le calcaire pur n'alterne jamais avec elles.

Leur association à de l'anhydrite, du gypse et du sel gemme.

Les dolomies stratifiées sont en général associées à des dépôts d'anhydrite et de gypse, roches qu'on a considérées également comme dues à une épigénie[1]; elles accompagnent fréquemment aussi des dépôts de sel gemme. Ces trois dernières roches, qui offrent dans leurs allures des analogies frappantes, ont été, de même que la dolomie, rapportées à deux types de gisement. Le plus souvent elles sont subordonnées régulièrement à des terrains stratifiés, dont elles constituent un élément caractéristique, ainsi qu'on le voit dans le trias de l'Europe occidentale, dans celui de l'Espagne ou dans le terrain tertiaire des Carpathes. Ailleurs ce sont des dépôts adventifs qui paraissent se lier à des dislocations, comme on l'admet pour les gîtes des Alpes, du Salzbourg et de la Bavière, ceux des Pyrénées et de l'Algérie. Ainsi le caractère de double origine attribué aux dolomies se retrouve dans les gypses, anhydrites et sel gemme qui les accompagnent.

Teinte rouge et bariolures qui caractérisent les terrains salifères.

Un caractère très-remarquable de tous les terrains salifères, et qui dénote aussi les analogies et la singularité de leur formation, ce sont les teintes rouges, unies ou bariolées, que présentent les argiles, les grès et même certains amas de sel qui les composent. Je ne pourrais que reproduire ici les considérations par lesquelles M. Élie de Beaumont a rapproché ces divers faits connexes, et montré que, dans la masse d'eau qui a déposé les marnes irisées, il s'est sans doute passé des phénomènes analogues, par quelques-

l'attention. (*Annales de chimie et de physique*, t. XXVIII, p. 710, et Erdmann, *Jarhb. für pract. Chem.* t. XLIX, p. 52, 1850.)

[1] Voir les observations de M. Élie de Beaumont sur ce sujet. (*Explication de la carte géologique de France*, t. II, p. 90.)

uns de leurs résultats, à ceux qui accompagnent les phénomènes volcaniques[1].

Ces terrains à teinte rouge sont souvent superposés à des couches parfaitement régulières, dont la coloration ne présente rien d'anormal : telles sont les marnes irisées qui reposent sur le muschelkalk. Cette circonstance, jointe à la considération des vastes superficies qu'ils occupent souvent, ferait croire que la chaleur du globe n'aurait exercé son action sur eux que d'une manière indirecte et en quelque sorte détournée, en échauffant l'eau de la mer. Ce serait donc peut-être à la faveur d'une chaleur plus élevée, et d'actions chimiques auxquelles la contraction du chlorure de sodium n'était pas étrangère, que la mer aurait teint elle-même les terrains salifères, laissant ainsi une sorte de témoignage d'une température qu'elle aurait exceptionnellement éprouvée à certaines époques et dans des portions étendues de son bassin.

Épigénie immédiate dans diverses couches métallifères, comparable à la formation des dolomies.

On vient de dire que les dolomies régulièrement stratifiées sont attribuées à une épigénie du calcaire, et que c'est au moment du dépôt de ce dernier, et avant qu'il fût protégé par d'autres sédiments, que la transformation aurait eu lieu; or, il en est précisément de même pour certaines couches métallifères. Le schiste cuivreux du Mansfeld, les gîtes de fer lenticulaires de la Voulte et de Privas, les couches avec jaspe et minéraux métalliques des environs de Nontron ont été, ainsi que l'a fait remarquer M. Gruner, formées

[1] Élie de Beaumont. (*Explication de la carte géologique de France*, t. II, p. 94.) M. de Sénarmont a reconnu que le peroxyde de fer peut se déshydrater dans le sein même de l'eau, à des températures comprises entre 160 et 180 degrés. Cette réduction a même déjà lieu, d'après une expérience que j'ai faite, à 150 degrés seulement, dans une dissolution saturée de chlorure de sodium. J'ai aussi vérifié par l'analyse que les parties rouges des argiles bariolées ne diffèrent pas seulement des parties vertes ou grises par l'état de combinaison du fer, mais aussi par une proportion notablement plus forte de ce métal. Cette observation m'a conduit à imiter tout à fait les bariolures ordinaires des argiles, en faisant passer à chaud sur de l'argile ferrugineuse et successivement, des vapeurs d'acide chlorhydrique et d'eau. Certaines parties de l'argile se décolorent, tandis que les parties voisines se teignent en rouge aux dépens des premières.

antérieurement à toutes les assises qui les recouvrent aujourd'hui[1]. Cette sorte d'*épigénie immédiate*, dans l'eau même où ces divers dépôts se sont formés, paraît donc constituer un caractère commun aux dolomies, aux roches rubéfiées et bariolées, ainsi qu'à beaucoup de couches métallifères.

Association intime de la dolomie à certains gîtes métallifères.

Comme autre rapprochement avec les mêmes formations, je remarquerai encore que, dans des terrains d'âges variés, les gîtes métallifères sont souvent associés à la dolomie d'une manière si intime, qu'on ne saurait méconnaître qu'il y a lien d'origine entre ces deux sortes de dépôts. On peut citer comme exemples de ce fait les amas de calamine superposés au calcaire carbonifère de la Vieille-Montagne et de l'Eifel[2], ceux de San-Juan de Alcarras et de la province de Santander en Espagne; les gîtes de même métal du muschelkalk de la Silésie et de la Pologne[3], la dolomie zincifère d'Angleterre, les petits dépôts calaminaires de la France centrale, tels que Durfort (Lozère), Combecave (Lot), Alloue (Charente), les gîtes de galène des Alpujarras, les amas de fer de Vicdessos et du Canigou, dans les Pyrénées, les gîtes de manganèse du Nassau et ceux de Nontron (Dordogne), etc.[4]

Gisement du soufre, relation de son origine avec celle du gypse.

Le soufre natif, dans ses principaux gisements, est, en général, associé à des dépôts de gypse[5], soit par la relation de cause à effet, soit par la relation d'effet à cause. C'est ce qui se voit en Sicile et aux environs de Vieliczka en Pologne[6], de Teruel en Es-

[1] *Annales des mines*, 4e série, t. XVIII, p. 91.

[2] Max Braun. (*Zeitschr. d. deutschen geologischen Gesellschaft*, Jahrg. 1857.) Gîte de Stolberg. (A. Gaudry, *Bulletin de la Société géologique*, 2e série, t. VIII, 105.)

[3] Mémoire de MM. Karsten, de Carnall et autres sur cette contrée intéressante.

[4] On pourrait comprendre aussi dans cette énumération la couche de schistes cuivreux du Mansfeld, les couches de grès plombifère et cuprifère de la Moselle, qui paraissent avoir été formées, de même que les couches citées plus haut par M. Gruner, antérieurement à toutes les couches qui les recouvrent aujourd'hui.

[5] Quelquefois aussi à l'alunite, et plus rarement au sulfate de strontiane, comme en Sicile.

[6] Zeuschner, *Dépôt de soufre de Swoszowice*. (*Annales des mines*, 4e série, t. XVIII, 1850.)

pagne[1], dans plusieurs régions de l'Italie, sur les bords du Volga[2]. Que le soufre soit arrivé de la profondeur à l'état d'hydrogène sulfuré, de même que dans les solfatares et certains gîtes métallifères de la Toscane, où il se dépose journellement encore sur les boisages des galeries, et qu'il se soit ensuite partiellement transformé en sulfate de chaux par une combustion plus ou moins complète, ou bien, que des couches de sulfate de chaux aient éprouvé une réduction ultérieure et produit du soufre par une réaction bien connue, sous l'influence des matières organiques auxquelles il est souvent encore associé[3], il y a dans l'un et l'autre cas, entre le gypse et le soufre, des relations de métamorphisme ou d'épigénie.

On peut remarquer toutefois que le premier phénomène paraît à peu près constamment accompagné d'une température élevée, tandis que la réduction des sulfates, même à l'état de dissolution, semble paralysée par toute élévation de chaleur capable d'arrêter les fermentations ou décompositions putrides qu'éprouvent spontanément les matières organiques[4].

Les bitumes et autres carbures d'hydrogène, selon leur état Gîtes de bitume

[1] Les couches tertiaires de Teruel, où les planorbes et les lymnées sont remplies de soufre, sans que le test de ces coquilles ait disparu, et où la même substance s'est substituée aux tiges de chara, sont bien connues par les descriptions de MM. Esquerra del Bayo, Max Braun, de Verneuil et Collomb.

[2] Pallas, t. I, 197 et 202. Murchison, *Russia*.

[3] C'est sans doute à un phénomène de ce genre qu'est due l'attaque du doublage des navires dans certaines mers d'Afrique, ainsi que ce fait observé par le capitaine Wilmot sur les côtes du même continent, qu'il se dépose dans la mer du soufre mélangé, à peu près à poids égal, à une matière organique. (L'Institut, 13 mars 1844.)

[4] La réduction du sulfate en sulfure n'a pas lieu à des températures très-élevées, d'après des expériences de M. de Sénarmont; ainsi les circonstances qui conviennent à la fermentation putride sont favorables à la réduction des sulfates en sulfures. J'ajouterai toutefois que le cuivre sulfuré s'est formé et a cristallisé à une température d'environ 70 degrés dans l'eau thermale de Plombières, ainsi que je l'ai annoncé ailleurs. (*Annales des mines*, 5e série, t. XII, p. 294.) Ce phénomène de réduction explique peut-être l'origine de certaines couches de sulfures métalliques, telles que le schiste cuivreux du Mansfeld.

et d'autres carbures d'hydrogène; salses; volcans de boue.

solide, liquide ou gazeux, tantôt imprègnent des bancs, tantôt en découlent (pétrole), tantôt s'échappent du sol, comme dans les salses, les volcans de boue, les sources inflammables, qui, d'ailleurs, ne sont en général que des évents de dépôts bitumineux[1]. Les divers gisements bitumineux présentent comme traits généraux ou au moins remarquablement fréquents :

1° D'être associés à des terrains salifères (Soultz-sous-Forêts, dans le Bas-Rhin; Landes; saline de Teklenbourg, dans le nord de l'Allemagne; sel décrépitant de Wieliczka, et autres régions des Carpathes; Brazza, près de Spalatro, en Dalmatie; Albanie, Perse, Chine, États-Unis, etc.);

2° D'être situés dans le voisinage de dépôts de combustibles ou de couches chargées de débris végétaux (Lobsann; Basses-Alpes; Seefeld et Hering en Tyrol; Bovey, en Devonshire; Derbyshire, environs de Newcastle et de Glascow, etc.);

3° D'être, soit rapprochés d'accidents ignés, anciens ou modernes, c'est-à-dire de volcans ou de roches éruptives (Val di Noto, près de l'Etna; Auvergne, Gaujac dans les Landes, où le bitume sort d'un terrain salifère renfermant du lignite, au pied d'un pointement d'ophite; Java, Cap Vert); soit associés à des terrains disloqués (Hering, en Tyrol; salses de la Crimée, de la presqu'île de Taman[2] et de la mer Caspienne qui sont dans le prolongement du Caucase);

4° D'être fréquemment accompagnés de sources thermales, souvent sulfureuses, et de dépôts de soufre (terrain permien du Volga; presqu'île de Kertch et diverses localités voisines du Caucase; environs de Mossoul, en Perse). Ces deux dernières circonstances paraissent résulter des associations qui ont d'abord été signalées.

Expérience relative à ce sujet.

Plusieurs de mes expériences rendent compte de ces relations. En soumettant des fragments de bois à l'action de l'eau surchauf-

[1] Cette dernière relation est évidente dans les Apennins, en Albanie; dans la presqu'île de Taman, aux environs de Tiflis, etc.

[2] *Mémoires de la Société géologique de France*, t. III, 1838.

fée, je les ai transformés, eu milieu même de l'eau, en lignite, en houille ou en anthracite, selon la température, et j'ai obtenu en outre des produits liquides et volatils ressemblant aux bitumes naturels et possédant jusqu'à l'odeur caractéristique du pétrole de Bechelbronn. C'est ainsi qu'on conçoit la présence du bitume dans certains filons métallifères concrétionnés (Derbyshire, Camsdorf, Raibl en Carinthie).

En résumé, les bitumes sont probablement des dérivés de substances végétales[1]; ils paraissent ne pas être de simples produits de distillation sèche, mais avoir été formés avec le concours de l'eau, et peut-être sous pression : le graphite ne serait que le produit le plus épuisé de ces substances[2]. Ces diverses combinaisons carburées se rattachent donc à des transformations qui se passent dans l'intérieur des roches, vraisemblablement sous l'influence d'une température élevée. L'activité, et même la violence, parfois capable de produire de petits tremblements de terre, avec laquelle divers dégagements d'hydrogène carboné ont lieu dans la Tauride, au bord de la mer Caspienne, aux environs de Carthagène, dans l'Amérique du Sud, prouvent que les actions qui ont autrefois isolé le bitume continuent encore aujourd'hui.

CHAPITRE V.

GÎTES MÉTALLIFÈRES DANS LEUR RELATION AVEC LE MÉTAMORPHISME.

Des combinaisons métalliques ont souvent accompagné les agents qui ont produit le métamorphisme.

Les combinaisons métalliques provenant des profondeurs se sont très-fréquemment accumulées dans les fentes que présentaient les terrains et ont formé les filons métallifères.

Quelquefois aussi ces combinaisons et les divers autres composés qui les accompagnaient se sont répandus dans les roches, dont

[1] Quoique M. Berthelot et d'autres chimistes soient parvenus, à l'aide de méthodes ingénieuses, à obtenir par voie synthétique des combinaisons dites *organiques*, rien n'autorise jusqu'à présent à croire qu'il en puisse être ainsi pour les bitumes.

[2] Le graphite et le bitume sont associés à Java, à proximité des terrains volcaniques, et dans un terrain tertiaire, à lignite, d'où il sort des jets d'hydrogène carboné.

elles ont pénétré la substance en lui faisant subir des transformations profondes. C'est ainsi que s'y sont introduits, à proximité de roches éruptives, les amas de fer oligiste de Framont, les dépôts du Banat, des environs de Christiania et de Turjinsk, où des minerais métalliques sont enchevêtrés au milieu de silicates, produits en même temps qu'eux dans la roche sédimentaire elle-même. De même, l'étain est arrivé dans beaucoup des amas qu'il constitue aujourd'hui, en réagissant profondément sur les roches encaissantes, comme je l'ai montré depuis longtemps, et en y engendrant des minéraux caractéristiques.

Quand des massifs entiers de terrains ont métamorphisé, il arrive parfois que, sur de vastes étendues, des substances métalliques se sont logées entre leurs feuillets, dans des conditions telles qu'il est impossible de résister à l'idée que leur arrivée est liée à la cause même qui a produit le métamorphisme. Comme exemple, je citerai l'or associé à la pyrite de fer ou au mispickel, dans le Zillerthal, en Tyrol, dans la Galice, en Espagne, où il est en outre accompagné d'étain; mais c'est surtout dans l'Oural, au Brésil, dans les Alleghanys[1], que ces terrains à la fois aurifères et métamorphiques atteignent de grandes dimensions.

En résumé, les dépôts métallifères, ainsi que les épanchements siliceux qui sillonnent beaucoup de contrées, ne sont que des cas particuliers des phénomènes métamorphiques.

CHAPITRE VI.

DÉCOMPOSITION DES ROCHES SILICATÉES ET SOURCES MINÉRALES.

Des causes, paraissant avoir une certaine analogie avec celles qui ont changé les couches sédimentaires en roches cristallines, ont souvent produit un effet inverse, et ont transformé des roches silicatées cristallines en silicates hydratés, tantôt amorphes et terreux, tels que les argiles, la stéatite, la terre verte, tantôt eux-mêmes cristallins, comme les zéolithes.

[1] Sur ce dernier pays, un mémoire récent de M. Lieber fournit des renseignements détaillés et intéressants. (Cotta, *Gangstudien*, t. II, 1860.)

On sait, surtout depuis les recherches d'Ebelmen, comment les agents atmosphériques décomposent graduellement les roches silicatées[1]. L'acide carbonique de l'atmosphère, l'acide nitrique, qui s'y développe journellement, comme l'atteste le phénomène si général de la nitrification, enfin les acides organiques résultant de la décomposition des matières végétales, éliminent graduellement les alcalis et les terres alcalines, et les résidus, dans lesquels l'alumine se concentre de plus en plus, deviennent finalement des hydrosilicates d'alumine de la famille des argiles.

Formation des argiles par les actions atmosphériques.

Mais ce n'est pas seulement au voisinage de l'atmosphère que les argiles ont pu dériver de la transformation des roches silicatées cristallines.

Elles ont souvent été produites par l'action d'émanations souterraines sur les roches préexistantes.

Les fumarolles volcaniques réduisent souvent les masses qu'elles traversent en véritables argiles, ordinairement bariolées (îles Lipari, solfatare de Pouzzoles, Islande, Açores, Kamtschatka[2]). C'est là sans doute l'origine des boues que rejettent parfois les grands volcans des Andes. L'acide carbonique suffit même pour produire une décomposition analogue, ainsi que M. Fournet l'a reconnu depuis longtemps en Auvergne.

Fumarolles volcaniques.

Les solutions alcalines que renferment beaucoup de sources thermales, celles de Plombières, par exemple, paraissent décomposer les roches silicatées aussi énergiquement que le font les acides des fumarolles.

Eaux alcalines.

Des effets semblables se constatent souvent dans le voisinage des dépôts métallifères. Ainsi le gîte de kaolin d'Aue, en Saxe, résulte certainement d'une décomposition du granit près des filons de fer qui le traversent; cet exemple peut être considéré comme le type de beaucoup de faits du même genre[3]. Les divers amas

Association fréquente de gîtes de kaolin et de halloysite à des gîtes métallifères.

[1] Je ne puis mentionner ici les importants travaux de MM. Fuchs, Berthier, Forchhammer, Turner, Fournet, Al. Brongniart, Malagutti et autres.

[2] D'après les observations de Breislack, de MM. Hoffmann, Bunsen, Darwin et autres. M. Charles Deville a expliqué par une expérience cette réaction de l'hydrogène sulfuré sur les roches.

[3] Sosa en Saxe, près d'un filon de quartz, avec minerai de fer; environs d'Alençon, près d'un filon de quartz; gîtes de la Loire, d'après M. Gruner et M. Rozet;

de kaolin exploités en Cornouailles sont aussi associés aux gîtes d'étain; ils portent, ainsi que je l'ai remarqué depuis longtemps, la date et comme le stigmate de leur origine dans la substitution de l'oxyde d'étain et de la tourmaline aux cristaux de feldspath qui ont été dissous. Le kaolin de Middletown, dans le Connecticut, avoisiné de silicates fluorés et de colombite, résulte probablement d'actions semblables.

Ces derniers faits nous autorisent à penser que des phénomènes analogues ont dû produire la décomposition des roches cristallines en kaolin, là même où l'on n'aperçoit pas aujourd'hui de dépôts métallifères; car, dans ce cas, les eaux qui ont agi pouvaient bien ne pas contenir de dissolutions métalliques. Le granit des Vosges est souvent altéré, notamment à Plombières, jusqu'à de grandes profondeurs. Quelquefois même, comme je l'ai montré ailleurs, la décomposition et la régénération du feldspath ont souvent eu lieu sur des points voisins, constituant ainsi comme deux phénomènes complémentaires[1].

La décomposition et la régénération du feldspath se sont souvent produites sur des points voisins l'un de l'autre.

C'est peut-être à des actions du même genre qu'il faut rattacher la transformation, à l'état argileux, de massifs entiers de porphyre feldspathique, ce qui a valu, en allemand, à cette variété, le nom de *thonporphyr:* les cristaux de feldspath, tout en étant parfaitement formés, ne sont plus, en général, que du kaolin.

État de décomposition de beaucoup de porphyres feldspathiques.

Les sources de Plombières, qui nous ont donné des exemples de la production de minéraux, nous montrent aussi que certains hydrosilicates d'alumine du groupe des argiles ne proviennent pas d'une décomposition *sur place.* L'halloysite ou savon de Plombières, dont ces sources rapportent des profondeurs les éléments en dissolution, vient se déposer dans les canaux des sources, à la

Argiles produites à la manière des précipités chimiques.

feldspath décomposé des arkoses de la France centrale, etc. halloysite de Louhassoa, près Bayonne; kaolin d'Eschassières, dans l'Allier, dans le porphyre feldspathique, d'après M. Boulanger. Ce sont des faits de ce genre qui avaient porté MM. Brongniart et Malagutti à attribuer la décomposition du feldspath à des effets voltaïques.

[1] *Annales des mines,* 5e série, t. XII, p. 315, 1857.

manière d'un véritable précipité chimique[1]. On doit attribuer une origine semblable aux halloysites, lithomarges et autres hydrosilicates d'alumine qui, dans la France centrale, au Hartz, en Saxe et ailleurs, accompagnent souvent les gîtes métallifères avoisinant le granit[2].

Production des zéolithes par épigénie, au moins dans certains gisements.

Les zéolithes, et nous le démontrerons plus loin, sont souvent aussi le résultat d'une véritable épigénie.

Substitution fréquente de silicates magnésiens à des minéraux de nature variée.

Quant à la substitution fréquente de silicates magnésiens, stéatite, serpentine et talc, ou de la chlorite à des minéraux très-différents, elle paraît résulter de procédés de transformation qui ne sont pas sans analogie avec ceux dont il vient d'être question[3].

Les phénomènes chimiques superficiels ne sont pas étudiés ici.

Si l'on prend le métamorphisme dans le sens le plus étendu du mot, quelques phénomènes d'origine superficielle se rattacheraient peut-être de loin au sujet qui m'occupe; telles seraient la précipitation du minerai de fer des marais, la production des nitrates, celle du carbonate de soude au fond des lacs, la formation des cailloux impressionnés, la décomposition de galets en kaolin, etc. Mais il serait difficile d'embrasser ici dans leur ensemble toutes ces transformations incessantes qui sont comme la vie du monde inorganique; je me restreindrai aux actions *d'origine profonde*.

[1] *Mémoire sur la relation des sources thermales de Plombières avec les filons métallifères.* (*Bulletin de la Société géologique de France*, 2e série, t. XVI, p. 567.)

[2] Berthier, *Annales des mines*, 2e série, t. III, p. 255. Dufrénoy, mêmes annales, 3e série, t. III, p. 393. Halloysites avec manganèse, près Nontron et Thiviers; avec galène et calamine, à Villefranche, Angleur, près Liége, la Vieille-Montagne, Tarnowitz; avec l'oxyde de fer, à la Voulte; lithomarges avec l'étain oxydé, à Ehrenfriedersdorf, Zinnwald, etc.

[3] L'attention a été depuis longtemps dirigée sur les épigénies, dont on connaît des exemples remarquables, à Gopfersgrun et Thiersheim, près Wunsiedel, en Franconie; à Snarum, en Norwége; à Predazzo, en Tyrol; au Canada, et dans les roches cristallines des Alpes, y compris le protogyne. MM. Blum, Bischof, Volger et d'autres ont fait de nombreuses remarques sur l'origine probable de ces intéressantes substitutions. L'hypothèse d'une épigénie est confirmée par l'observation qu'a faite M. de Sénarmont, que des cristaux de serpentine coupés en tranches minces laissent passer la lumière, sans lui imprimer aucune des propriétés qui caractérisent une véritable cristallisation, et que, par conséquent, ils n'appartiennent pas à des cristaux *sui generis*. (*Annales des mines*, 5e série, t. VIII, p 498.)

TROISIÈME PARTIE.

CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES SUR LA CAUSE DES PHÉNOMÈNES MÉTAMORPHIQUES; EXPÉRIENCES SYNTHÉTIQUES A L'APPUI.

Dans les considérations théoriques que je vais exposer, je m'occuperai d'abord des roches dont l'origine métamorphique est démontrée par les conditions de leur gisement; les roches cristallines les plus anciennes ou azoïques, que l'on a quelquefois aussi considérées comme métamorphiques, mais sans les mêmes preuves à l'appui, feront l'objet d'un appendice qui termine ce travail. Quant aux dolomies et aux roches qui s'y rattachent, je n'ajouterai rien aux faits et aux explications que j'ai mentionnés dans la seconde partie.

CHAPITRE PREMIER.

LA CHALEUR INTERNE; EXAMEN DE SES EFFETS SUR LE MÉTAMORPHISME. ELLE NE SUFFIT PAS POUR EXPLIQUER TOUS LES PHÉNOMÈNES.

La chaleur interne du globe est la cause première des phénomènes.

Les modifications des terrains compris sous le nom de métamorphiques ont incontestablement eu lieu à une température plus élevée que celle qui règne maintenant à la surface du globe. On peut le conclure d'abord du seul fait des analogies minéralogiques de ces terrains avec les roches éruptives, et notamment de la présence de nombreux silicates anhydres qui forment un de leurs traits les plus remarquables; en second lieu, de leur relation évidente avec des dislocations, dont le point de départ est toujours dans les régions profondes, et qui ont incontestablement pour cause première la chaleur interne du globe.

Elle a dû élever la température des sédiments, à mesure qu'ils étaient recouverts par d'autres.

La chaleur propre du globe décroît nécessairement du centre vers la surface, et, par conséquent, des sédiments déposés dans l'Océan, à la température relativement basse qui règne généralement dans ses profondeurs, ont dû, quand ils ont été recouverts

ensuite par d'autres couches, acquérir une température plus élevée en raison de leur plus grand éloignement de la surface de rayonnement[1]. La superposition de remblais puissants, comme le sont certains terrains stratifiés, a pu souvent suffire pour déterminer le réchauffement notable des masses inférieures postérieurement à leur dépôt, surtout aux époques où l'accroissement de la chaleur selon la verticale suivait une loi beaucoup plus rapide qu'aujourd'hui.

On peut ajouter une observation : actuellement que le fond d'une grande partie de l'Océan ne paraît pas dépasser la température de trois ou quatre degrés, par ce fait seul qu'un dépôt sédimentaire serait mis à sec dans les régions tempérées, et que sa surface gagnerait par conséquent quelques degrés de température moyenne, tous les points situés sur une même verticale devraient également augmenter de température[2].

Ainsi la propagation régulière de la chaleur du globe a pu agir sur des terrains entiers et y produire graduellement la transformation que M. Élie de Beaumont a caractérisée par le nom de *métamorphisme normal.*

A part les effets de cette cause générale et en quelque sorte latente, il est des parties circonscrites où la chaleur s'est portée très-près de la surface, notamment à la suite des roches éruptives. De là, des centres particuliers, autour desquels la chaleur interne est venue produire le *métamorphisme accidentel* ou *de juxtaposition.*

La chaleur seule est loin de rendre compte des principales circonstances du phénomène.

Toutefois, des raisons très-puissantes font croire que, dans l'un et dans l'autre cas, ce n'est pas la chaleur seule qui a agi. Lors même que la température eût pu devenir assez haute dans les roches transformées pour en opérer le ramollissement, ce qui est

[1] Cette remarque est due à M. Babbage. (Lond. Edinb. *Phil. mag.* V. 213.) Sir John Herschel a fait des observations sur les réactions chimiques qu'ont dû subir les terrains par suite de cette élévation ultérieure de température. Le fond de la mer étant à une basse température, on ne pouvait admettre le réchauffement des couches sédimentaires, dans les termes où l'avait indiqué Hutton.

[2] D'après la remarque de sir John Herschel, notice précitée.

le plus souvent tout à fait improbable[1], elle serait insuffisante pour rendre compte de la diversité des effets constatés. Les observations suivantes le prouvent.

Grandeur et uniformité d'action.

Si la chaleur seule est cause des modifications qu'on observe dans des terrains dont la puissance dépasse souvent mille mètres, comment cette action s'est-elle étendue sur une telle épaisseur? Pourquoi, au moins, n'est-elle pas, d'après les lois connues de la propagation de la chaleur, et à raison de la faible conductibilité des roches, d'une énergie incomparablement moindre dans les parties éloignées que dans les parties voisines de la surface d'arrivée? C'est pourtant ce qui n'existe pas, et la grandeur, comme l'uniformité des effets produits dans des massifs montagneux entiers, est un phénomène des plus frappants[2].

Mode d'agencement des minéraux.

De plus, si, laissant de côté les relations d'ensemble, on passe aux faits de détail, on trouve encore dans le mode d'agencement des minéraux des roches métamorphiques une foule de circonstances d'association ou de gisement qui empêchent d'admettre pour ces minéraux une origine due à la chaleur seule.

Pour en citer un exemple, je rappellerai le fait si fréquent de la cristallisation de silicates alumineux, comme la chiastolite et la staurotide, au milieu de phyllades fossilifères, et celles du grenat, du pyroxène ou du feldspath dans des calcaires également d'origine sédimentaire, qui souvent même ne sont pas sensiblement modifiés.

La chaleur, puis la cristallisation, qui est la conséquence du refroidissement, peuvent, il est vrai, opérer des départs ou liquations entre des substances qui étaient primitivement dissoutes l'une dans l'autre; c'est ainsi que le carbone se sépare de la fonte, en cristaux, à l'état de graphite. Mais l'expérience directe ne nous montre rien d'analogue au développement, sous l'action de la

[1] MM. Bischof et Durocher ont insisté sur des arguments de ce genre.

[2] Souvent aussi, dans le métamorphisme de juxtaposition, ce n'est pas toujours dans les parties les plus voisines du contact des roches éruptives que les effets ont été le plus énergiques; M. Durocher a donné divers exemples de ce genre.

chaleur, de cristaux isolés de grenat, de pyroxène, de feldspath, de disthène, dans une gangue calcaire, qui n'a pas même été ramollie, et qui, selon toutes les apparences, n'a été que très-faiblement échauffée.

On conçoit que des actions lentes, comme la nature en emploie si souvent pour élaborer les produits minéraux, soient capables de bien des résultats que l'homme est impuissant à imiter; mais a-t-on le droit de chercher exclusivement dans la durée du temps et dans des causes vagues, pour ainsi dire occultes, des explications que rien d'ailleurs ne justifierait?

Un même minéral peut se trouver parfaitement isolé et cristallisé, au milieu de matrices très-différentes : par exemple, la tourmaline, le mica, le feldspath, le grenat, l'épidote, se présentent souvent, au milieu du quartz, avec les mêmes caractères que dans le sein du calcaire ou de la dolomie. Cette indépendance des silicates à l'égard de leur gangue paraît aussi annoncer que les minéraux ne sont pas de simples produits de liquation, puisque des milieux aussi différents n'auraient pas sécrété des composés identiques.

Partout, d'ailleurs, on rencontre, dans les roches métamorphiques, des minéraux très-inégalement fusibles, qui ont cristallisé dans un ordre de succession tout à fait opposé à celui qu'on aurait dû attendre, dans l'hypothèse en question, de leurs rapports de fusibilité.

Apport d'éléments étrangers.

Des arguments de nature diverse s'opposent donc à ce qu'on admette qu'un métamorphisme, n'ayant pas d'autre cause que la chaleur, ait donné naissance, dans les roches qui l'ont subi, aux minéraux qu'on y rencontre, même quand ces minéraux ne paraissent pas contenir de corps simples, étrangers à la composition normale primitive. Mais combien cette conclusion est-elle plus démonstrative quand on voit, au Brésil, le changement d'état des roches coïncider visiblement avec l'introduction de corps tout spéciaux qui, selon toute probabilité, n'ont pu venir s'y fixer qu'ultérieurement?

CHAPITRE II.

DE CERTAINES VAPEURS CONSIDÉRÉES COMME AUXILIAIRES DE LA CHALEUR; LEUR ACTION COMBINÉE AVEC CELLE DE LA CHALEUR EST ENCORE INSUFFISANTE.

Les vapeurs volcaniques ont pu servir d'auxiliaire à la chaleur.

Si la chaleur seule a été impuissante à produire les effets dont nous venons de parler, son action, aidée de certains corps gazeux ou faciles à réduire en vapeur, pourra-t-elle suffire à leur explication? C'est l'idée qui s'est naturellement présentée la première à l'esprit; car la nature montrait des vapeurs abondantes et à affinités énergiques, dans les exhalaisons des cratères des volcans ou de leurs laves encore incandescentes. Ces vapeurs et gaz sont des composés où dominent les corps électro-négatifs, que les anciens minéralogistes appelaient, comme par instinct, les *minéralisateurs*, savoir : le chlore, le soufre, le carbone; plus rarement le fluor et le bore. (Les observations récentes de MM. Boussingault, Bunsen et Charles Deville ont contribué à en bien faire connaître la nature.)

Acides carbonique, sulfhydrique, sulfurique.

L'acide carbonique, l'acide sulfhydrique, l'acide sulfurique même, ont pu réagir autrefois sur quelques roches, d'une manière semblable à ce que l'on observe dans certaines masses de gypse et d'alunite qui se forment encore aujourd'hui en Toscane[1], ou dans les roches voisines des volcans des Andes et de Java, qui se réduisent sous leur action en une véritable boue.

Chlorures et acide chlorhydrique; exemples de leurs effets.

La décomposition de vapeurs chlorurées forme, également sous nos yeux, le fer oligiste, et a pu donner naissance autrefois, dans beaucoup de leurs gisements, à l'oxyde d'étain et à l'oxyde de titane, comme l'apprennent à la fois l'observation et l'expérience synthétique. C'est d'une manière analogue que la magnésie cristallisée ou périclase, engagée dans les calcaires rejetés de la Somma, a peut-être été produite par la décomposition du chlorure de magnésium par le carbonate de chaux. Cette supposition, que rendait vraisemblable l'abondance de vapeurs chlorurées du volcan actuel, a été

[1] Notamment à Selvena et à Pereta, comme l'a montré M. Coquand. (*Bulletin de la société géologique de France*, 2e série, t. VI, p. 91.)

confirmée par l'expérience dans laquelle j'ai imité artificiellement ce minéral[1]. Il est remarquable de voir les mêmes corps, qui produisent la périclase aux dépens du calcaire, former, en dissolution et à une température moindre, de la dolomie.

Le rôle qu'ont joué les chlorures à de hautes températures, pour produire la cristallisation des minéraux, ressort d'ailleurs clairement des expériences plus récentes de MM. Manross, Forchammer et Henri Deville.

D'autres expériences ont aussi montré que les chlorures de silicium et d'aluminium, en réagissant à l'état de vapeur sur les bases qui entrent dans la constitution des roches, y forment des silicates simples ou multiples qui sont identiques à certains produits naturels[2]. Or, si le mica exhale encore par la chaleur des fluorures de silicium, de bore et de lithium, osera-t-on affirmer que les pâtes granitiques n'aient pas aussi renfermé dans l'origine des chlorures de silicium et de bore, bien qu'on ne les trouve pas au milieu des vapeurs qu'on recueille aujourd'hui à proximité des orifices volcaniques; car ils ne manqueraient pas d'y être décomposés et précipités par la vapeur d'eau avant d'arriver à l'atmosphère? D'ailleurs, ne voit-on pas encore le chlore fixé en quantités considérables dans certains massifs cristallins, comme la syénite zirconienne de Norwége et la roche de l'Ilmen (miascite), où il est principalement combiné à l'éléolithe, et où il fait partie du cortége du zirconium, du tantale et d'autres métaux rares qui sont presque exclusivement propres à ces roches?

Quant au fluor et au bore[3], j'ai fait voir depuis longtemps qu'ils Composés fluorés

[1] *Recherches sur la production artificielle des minéraux de la famille des silicates et des aluminates par la réaction des vapeurs sur les roches.* (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. XXXIX, p. 135.)

[2] Mémoire de M. Daubrée qui vient d'être cité.

[3] La présence du fluor, déjà reconnue dans diverses roches volcaniques modernes, a été constatée par M. Scacchi dans un dépôt récent de fumarolles du Vésuve. Quant au bore, d'après les énormes quantités qui sortent des soffionis de la Toscane et les dépôts notables du cratère de Vulcano, on ne peut guère douter qu'il n'en existe dans beaucoup d'autres localités où il a passé inaperçu jusqu'à ce jour.

et borés; leur intervention probable dans la formation des gîtes d'étain et des terrains métamorphiques caractérisés par les mêmes minéraux.

paraissent avoir concouru à la formation de beaucoup d'amas stannifères[1]. Ils entrent, en effet, dans la constitution de silicates caractéristiques, comme la topaze et la tourmaline, qui y ont été certainement engendrés en même temps que l'oxyde d'étain[2].

Ces conclusions sont également applicables à des roches dont l'origine métamorphique est due, selon toute vraisemblance, à des phénomènes analogues. Telle est la roche bien connue de Schneckenstein, en Saxe, où ces topazes et ces tourmalines paraissent être venues s'insinuer entre les feuillets du schiste, tout en cimentant, concurremment avec le quartz, les nombreux fragments dans lesquels ce schiste avait été concassé. Il en est de même au Brésil, pour des terrains entiers, tels que les roches schisteuses où abonde la topaze, dans la contrée de Villarica, et dans lesquelles l'or et le diamant se sont produits sur de vastes étendues avec les mêmes minéraux caractéristiques. Ces terrains ne sont en quelque sorte qu'une accumulation, sur un grand espace, des gangues habituelles de l'oxyde d'étain[3]. Il reste, d'ailleurs, encore fixé dans le granit des quantités assez sensibles de fluor et même de bore, pour que l'on admette que cette roche a pu fournir, avant de se solidifier, des quantités notables de vapeurs où ces corps étaient en combinaison.

Ces idées sur l'intervention du fluor et du bore, qui datent de vingt ans, ont encore acquis plus de valeur depuis que M. Henri Deville a fait cristalliser une série de minéraux à l'aide des fluorures, et que, d'autre part, la présence du fluor et du bore a été

[1] *Mémoire sur le gisement, la constitution et l'origine des amas de minerai d'étain.* (*Annales des mines*, 3e série, t. XX, p. 65, 1841.) *Recherches sur la reproduction artificielle de l'oxyde d'étain, de l'oxyde de titane, etc.* (*Annales des mines*, 4e série, t. XVI, p. 129, 1849.)

[2] Ce premier rapprochement établi entre le bore et l'étain sur des données purement géologiques a été suivi de la découverte d'une analogie inattendue entre deux corps dont les propriétés chimiques sont si différentes : je veux parler de leur isomorphisme, qui a été démontré par les études de M. Sella.

[3] Je suis d'ailleurs bien loin de penser que ces diverses roches quartzeuses aient été formées sans la présence de l'eau; je vais bientôt revenir sur ce sujet.

constatée dans beaucoup d'eaux minérales, et même celle du premier dans l'eau de la mer.

Ainsi, en unissant à l'action de la chaleur les auxiliaires dont je viens de parler, il est clair qu'on explique un plus grand nombre de transformations que par la chaleur seule; mais il ne l'est pas moins qu'on ne peut se rendre compte de certaines circonstances très-importantes qu'en attribuant aux vapeurs un rôle évidemment bien exagéré. C'est ce que M. Bischof et d'autres savants ont bien fait ressortir par de nombreuses considérations[1].

La chaleur, même avec l'auxiliaire de ces diverses vapeurs, ne peut expliquer des phénomènes considérables du métamorphisme.

CHAPITRE III.

DE L'EAU CONSIDÉRÉE COMME AGENT DE MÉTAMORPHISME.

Dans les exhalaisons volcaniques, il est un corps qui n'a pas tout d'abord fixé l'attention, parce que, sous l'empire des idées anciennes, il semblait tout à fait inerte, surtout en présence des minéraux dont il s'agit d'expliquer la formation, mais auquel pourtant le premier rôle paraît devoir être dévolu, dans les phénomènes métamorphiques aussi bien que dans les éruptions des volcans : ce corps, c'est l'eau, qui se trouve dans ces exhalaisons, non en quantité minime, comme les vapeurs dont nous venons de nous occuper, mais, au contraire, comme le produit à la fois le plus abondant et le plus constant des éruptions, dans toutes les régions du globe.

Abondance de l'eau dans les phénomènes volcaniques.

La singulière propriété que possèdent les silicates incandescents des laves de retenir pendant fort longtemps, et jusqu'au moment de leur solidification, des quantités d'eau considérables, démontre clairement que l'action de la chaleur n'exclut pas celle de l'eau, et paraît annoncer que cette dernière a, même à ces hautes températures, une certaine affinité pour les silicates.

Elle existe jusque dans les laves incandescentes.

[1] Comment, par exemple, admettre une telle origine pour la formation de cristaux de feldspath ou de grenat dans des couches régulières, qui sont souvent à peine modifiées ?

Son intervention déjà reconnue dans la formation des filons métallifères, et soupçonnée dans la cristallisation des roches éruptives.

Nous ne connaissons des masses situées à une certaine profondeur dans notre globe que ce qu'en apportent les volcans; or ces déjections renferment toutes, sans exception, de l'eau, soit combinée, soit mélangée; nous sommes donc en droit de penser que l'eau joue un rôle tout à fait important dans les principaux phénomènes qui émanent des profondeurs. On a vu, en effet, dans la partie historique de ce travail, que des motifs concluants ont déjà fait attribuer à l'eau des actions très-puissantes, telles que la formation de beaucoup de filons métallifères, et une influence incontestable sur la cristallisation des roches éruptives elles-mêmes, y compris le granit.

Ce que les laves apprennent de son action.

A la vérité, les laves les plus chaudes et les plus chargées d'eau, ainsi que les basaltes et les trachytes, ne modifient pas les roches sur des épaisseurs notables; mais cela tient sans doute à ce que, dès qu'elles passent à la simple pression atmosphérique, l'eau peut s'échapper en se réduisant à l'état de vapeur.

La pression paraît nécessaire pour qu'elle produise un grand effet.

Les nombreux blocs de calcaire venus des foyers volcaniques dans les tufs de la Somma nous montrent, en effet, dans leurs géodes tapissées de minéraux si variés et si bien cristallisés, ce que peuvent subir des roches lorsqu'elles sont exposées à l'action permanente de certains agents, sous la pression sans laquelle quelques-uns de ces agents ne sauraient acquérir toute leur énergie, ni d'autres même subsister.

Quelque chose de tout à fait semblable est offert par le petit massif basaltique du Kaiserstuhl, dans le grand-duché de Bade[1]. Un lambeau de calcaire, arraché par le basalte aux terrains qu'il a traversés, a été modifié par lui de la manière la plus intime. Devenu tout à fait lamellaire, il renferme des cristaux de fer oxydulé titanifère, de pyrite de fer, de mica magnésien, de perowskite, de pyrochlore, du quartz cristallisé et d'innombrables aiguilles d'apatite. Le privilége, si exceptionnel parmi les roches

[1] *Annales des mines*, 5e série, t. XII, p. 322. Il en est encore de même des schistes devenus micacés que M. Mitscherlich a observés dans les produits volcaniques de l'Eifel. (Naumann, *Géognosie*, t. I, p. 791.)

en contact avec les basaltes, qui le caractérise, me paraît résulter de son gisement. Ce calcaire est en effet situé au fond d'un cirque de soulèvement : avant que la dernière dislocation éprouvée par le massif le mît au jour, il subissait, à une certaine profondeur, et par conséquent sous pression, l'action des eaux chaudes, dont le basalte était lui-même imbibé, dans les innombrables boursouflures duquel ces eaux ont déposé des minéraux.

De même que le calcaire du Kaiserstuhl, les calcaires si riches en minéraux variés de la Somma et celui du Latium ont été élaborés sur des points où se sont formés des cratères de soulèvement. Quand les couches qui fermaient hermétiquement le lieu où se passaient ces réactions chimiques ont donné, en se brisant, issue aux agents qui les produisaient, ces réactions ont cessé d'avoir lieu.

Or, quelle différence d'actions peut-il exister, dans le cas qui nous occupe, entre ce qui se passe à la surface et ce qui se passe dans les régions profondes? Pas d'autre, selon toute apparence, que celle qui est due à la différence des pressions. Si la vapeur d'eau très-chaude ne peut, pas plus que l'eau liquide chauffée sous la simple pression atmosphérique actuelle, arriver à produire, dans les expériences ordinaires, des silicates, tels que ceux que nous offrent les terrains métamorphiques, c'est qu'il manque pour cela quelque chose d'essentiel, et tout annonce que ce qui manque, c'est une plus forte pression.

Tout ce qui précède conduit à faire envisager l'eau comme un agent de première importance, et à étudier expérimentalement ses effets sous chaleur et pression.

Telles sont les considérations qui ont conduit d'abord à penser que le concours de la chaleur, de l'eau et de la pression avait pu produire les principaux phénomènes du métamorphisme. Il ne restait qu'à se placer dans des conditions aussi voisines que possible de celles dans lesquelles la nature paraît avoir agi, et à examiner si l'on obtiendrait la reproduction de minéraux caractéristiques. C'est le but d'une série d'expériences que j'ai entreprises et dont je vais rendre compte.

CHAPITRE IV.

EXPÉRIENCES SUR L'ACTION EXERCÉE DANS LA FORMATION DES SILICATES PAR L'ÉTAT SURCRITIQUE.

Plusieurs de ces expériences ont déjà été décrites dans un mémoire précédent[1]. Je crois cependant devoir reproduire ici les principaux résultats qui sont consignés dans ce travail, et y ajouter ceux que j'ai obtenus ultérieurement.

En comptant même pour rien le danger des explosions, qui sont souvent d'une violence tout à fait surprenante[2], les difficultés d'expérimentation m'ont empêché de multiplier ces résultats comme il eût été désirable : cependant les faits déjà reconnus sont concluants, et montrent la fécondité de cette voie d'expérimentation.

Fecondité d'expérimentation.

La difficulté principale consiste à trouver des parois et des fermetures qui résistent assez longtemps à l'énorme tension qu'acquiert la vapeur d'eau, quand la température approche du rouge sombre. L'eau et les matières qui doivent réagir sont placées dans un tube en verre que l'on scelle ensuite. On introduit ce tube en verre dans un tube en fer, à parois très-épaisses, qui est clos à la forge à l'une de ses extrémités. L'autre extrémité est

[1] *Observations sur le métamorphisme et recherches expérimentales sur quelques-uns des agents qui ont pu le produire.* (*Annales des mines*, 5e série, t. XII, p. 289, 1857; et *Bulletin de la Société géologique de France*, 2e série, t. XV, p. 97, 1848.)

[2] Des tubes, d'un diamètre intérieur de vingt et un millimètres et d'une épaisseur de onze millimètres, fabriqués avec du fer d'excellente qualité, font quelquefois explosion; ils se déchirent suivant une de leurs génératrices, et sont alors projetés en l'air avec un bruit comparable à celui d'un coup de canon. Si le fer n'avait point de défaut, et que l'on estimât qu'il conserve à 300 degrés la même ténacité qu'à froid, de telles déchirures supposeraient une pression intérieure de plus de 1,000 atmosphères. Il est à remarquer qu'avant d'éclater, le canon se bombe sous forme d'une ampoule de cinq à six centimètres de longueur, et c'est au milieu de cette ampoule que s'ouvre une sorte de boutonnière, de façon à rappeler d'une manière frappante le relief de la gibbosité de l'Etna, avec l'échancrure centrale du Val del Bove, dont l'origine a depuis longtemps été attribuée, par MM. de Buch et Élie de Beaumont, à une force expansive du même genre.

souvent fermée au moyen d'un long bouchon à vis, muni d'une tête carrée qu'on peut serrer fortement, en la tournant avec une clef. Entre la tête de la vis, qui doit être exécutée avec beaucoup de précision, et le rebord du tube, est placée une rondelle en cuivre bien pur; elle doit être assez mince pour pouvoir s'écraser, lors de la fermeture, par la pression du rebord, et s'incruster dans des rainures pratiquées à cet effet. Cependant, pour fermer la seconde extrémité, j'adopte maintenant de préférence un autre procédé, qui consiste à y rapporter à la forge un fort bouchon de fer, qui arrive à faire corps avec le canon, si la soudure a été habilement opérée. Il faut, pour réussir, un ouvrier très-adroit; car il est essentiel que la plus grande partie du canon reste froide, afin que l'eau intérieure, en se vaporisant, ne contrarie pas l'opération.

Pour contre-balancer, dans l'intérieur du tube de verre, la tension de la vapeur, qui pourrait le faire éclater, je verse de l'eau extérieurement à ce tube, entre ses parois et celles du tube de fer qui lui sert d'enveloppe. De cette manière, l'effort principal est reporté sur ce dernier tube, qui présente beaucoup plus de résistance.

Ces appareils, comme ceux dont M. de Sénarmont a fait usage, sont couchés sur le dôme ou sur les carneaux d'un four à cornues d'usine à gaz, en contact avec une maçonnerie qui est au rouge sombre, et enfouis sous une couche épaisse de sable.

Action énergique de l'eau sur les silicates tels que le verre.

A une température qui est au-dessous du rouge naissant, l'eau réagit très-énergiquement sur certains silicates.

Production d'un silicate zéolithique et de quartz, avec élimination d'un silicate soluble.

Ainsi le verre ordinaire donne, au bout de quelques jours, deux et souvent trois produits distincts : 1° une masse blanche et tout à fait opaque, qui résulte d'une transformation complète du verre; elle est poreuse, happant à la langue, et aurait l'aspect du kaolin si elle n'avait une structure fibreuse très-prononcée. La substance a perdu une quantité notable de son poids, environ la moitié de sa silice et le tiers de son alcali; il s'est formé un nouveau silicate qui a fixé de l'eau et qui appartient, par sa composition, à la fa-

mille des zéolithes[1]; 2° du silicate alcalin qui s'est dissous, en entraînant de l'alumine; 3° souvent il s'est en outre développé d'innombrables cristaux incolores, d'une limpidité parfaite, qui offrent la forme ordinaire bipyramidée du quartz, et qui, en effet, ne sont autres que de la silice cristallisée. Certains cristaux ainsi formés atteignent 2 millimètres au bout d'un mois. Tantôt ils sont isolés dans la pâte opaque, tantôt ils sont implantés sur les parois du tube primitif, où ils forment de véritables géodes, qu'il serait de toute impossibilité de distinguer, à la dimension près, de celles que les roches cristallines présentent si fréquemment.

Faible quantité d'eau nécessaire pour produire le métamorphisme.

Ce qui rend cette transformation du verre encore plus remarquable, au point de vue géologique aussi bien que sous le rapport chimique, c'est qu'elle s'obtient par une très-faible quantité d'eau, par un poids qui n'est pas même égal au tiers de celui du verre transformé.

Transformation de l'obsidienne en feldspath.

Les verres volcaniques connus sous le nom d'obsidienne se comportent d'une manière comparable aux verres artificiels. Des morceaux d'obsidienne chauffés, dans les mêmes conditions, se changent en un produit d'une nature grisâtre, cristalline, ayant l'aspect d'un trachyte à grains fins. La poussière de ce produit, examinée au microscope, montre tout à fait les caractères du feldspath cristallisé, et ressemble surtout au rhyacolite ou feldspath vitreux. On sait du reste que l'obsidienne paraît se rapprocher beaucoup du feldspath par sa composition chimique; des circonstances favorables auront sans doute déterminé la réunion de ses éléments dans les proportions définies où elles constituent ce dernier minéral.

La tendance que le feldspath manifeste ainsi à se produire par la voie humide, est à prendre en considération dans diverses circonstances géologiques.

[1] *Bulletin de la Société géologique de France*, 2e série, t. XVI, p. 588. A une température plus élevée, on obtient un silicate anhydre qui paraît voisin de la wollastonite.

Avec les fragments d'obsidienne sur lesquels j'ai opéré, se trouvaient des morceaux de feldspath vitreux détachés du trachyte du Drachenfels, et de l'oligoclase de Suède. Ces deux derniers minéraux n'ont subi aucune altération appréciable[1]. On ne peut toutefois affirmer que si l'eau n'avait pas immédiatement trouvé d'alcali à enlever à l'enveloppe vitreuse, elle n'en aurait pas pris au feldspath. Nous pouvons néanmoins déduire de ces deux derniers faits qu'en général les silicates des roches cristallines se sont vraisemblablement formés dans des conditions assez voisines de celles où ils se trouvaient de nouveau placés dans mes expériences.

Stabilité des feldspaths et d'autres silicates cristallisés dans les mêmes conditions.

Il en est à peu près de même des feuilles très-minces de mica potassique de Sibérie; elles ont à peine perdu de leur transparence.

Des cristaux de pyroxène n'ont pas plus changé d'aspect, si ce n'est que, comme les morceaux de feldspath et d'obsidienne, ils ont été si complétement enveloppés de cristaux de quartz, qu'il faut les briser pour en reconnaître la nature.

Pour examiner, autant du moins que la présence du verre le permettait, comment se comportent, à l'état surchauffé, les dissolutions naturelles de silicate alcalin, que l'on trouve communément dans les eaux, je me suis servi de l'eau provenant des sources thermales de Plombières, qui est comparativement riche en silicates de potasse et de soude. Cependant, ne pouvant opérer que sur 20 à 30 centimètres cubes, j'ai préalablement concentré cette eau par une évaporation assez rapide pour que l'acide carbonique de l'air n'en décomposât pas sensiblement les silicates, et de manière à la réduire au vingtième de son volume primitif.

Certaines eaux minérales surchauffées fournissent du quartz.

Après une expérience qui avait été arrêtée au bout de deux jours seulement, les parois du tube étaient déjà recouvertes d'enduits de silice sous la forme de quartz cristallisé et aussi de calcédoine. Comme le verre n'était encore altéré qu'à sa surface, ce

[1] Cependant le feldspath peut se décomposer à froid, par la trituration, comme je l'ai montré ailleurs. (*Annales des mines*, 5e série, t. XII, p. 547.)

dépôt devait provenir, presque en totalité, sinon entièrement, de la décomposition du silicate alcalin contenu dans l'eau de Plombières.

Ainsi, sans l'application d'aucun réactif chimique, sous la seule influence de la chaleur, l'eau tenant en dissolution des silicates alcalins, telle que celle des sources de Plombières, dépose du quartz cristallisé ou cristallin.

Feldspathisation des argiles dans les mêmes conditions.

Une nouvelle preuve de la facilité avec laquelle les minéraux du groupe des feldspaths peuvent se produire en présence de l'eau est fournie dans l'expérience suivante, que j'ai faite dans le but d'expliquer des feldspathisations assez fréquentes, même dans les roches fossilifères.

Du kaolin parfaitement purifié, par le lavage, de tout débris feldspathique, ayant été traité dans un tube par l'eau de Plombières, cette masse terreuse est transformée en une substance solide, confusément cristallisée en petits prismes, et qui raye le verre. Après avoir purifié cette substance par un lavage à l'eau bouillante, on voit qu'elle est devenue fusible en émail blanc; l'acide chlorhydrique ne l'attaque plus. C'est un silicate double d'alumine et d'alcali qui a tous les caractères du feldspath; il est mélangé d'un peu de quartz cristallisé.

Cette réaction peut se comparer à la facilité avec laquelle le silicate d'alumine absorbe la chaux à froid dans un mortier hydraulique.

Formation de pyroxène diopside.

A la surface et dans l'intérieur de la masse blanchâtre résultant de la transformation du tube, j'ai obtenu d'innombrables cristaux très-petits, mais de forme parfaitement nette, doués de beaucoup d'éclat et bien transparents; ils présentent diverses nuances de vert, et beaucoup d'entre eux ont la teinte vert-olive qui est habituelle au péridot. Leur forme est celle d'un prisme oblique symétrique, dont les bases sont remplacées par deux biseaux; deux des arêtes opposées sont ordinairement tronquées, comme dans le pyroxène que Haüy a nommé homonome. Ces cristaux rayent sensiblement le verre; ils restent inaltérables

en présence de l'acide chlorhydrique concentré et bouillant. Ils fondent au chalumeau en un émail noir. Enfin, ils ont la composition du pyroxène à base de chaux et de fer; et, par leur transparence, ils appartiennent à la variété *diopside*.

Hémitropie de quelques-uns des cristaux.

Ces cristaux sont, les uns isolés, les autres groupés de manière à former de petits globules hérissés de pointements, et, plus rarement, des incrustations minces. Les uns et les autres rappellent immédiatement, par leur aspect, les cristaux de diopside les plus connus.

Paillettes hexagonales ayant l'aspect du mica.

De l'argile de Klingenberg, près Cologne, que l'on emploie pour faire les creusets de verrerie, étant chauffée dans des tubes en verre, se charge d'une multitude de paillettes blanches, nacrées et douées de l'éclat du mica; ces paillettes sont hexagonales et jouissent d'un axe optique de double réfraction[1]. Elles sont fusibles et indiquent au chalumeau la présence de la silice; elles sont attaquables par l'acide chlorhydrique, qui manifeste les réactions de l'alumine. La trop faible quantité que j'ai pu en obtenir jusqu'à présent ne m'a pas permis d'en faire l'analyse quantitative. Il paraît toutefois très-probable que la substance est un mica à un axe ou une chlorite.

Réduction du bois en anthracite.

Les végétaux fossiles ayant subi des modifications sous l'influence des mêmes agents que les matières pierreuses, il convenait de voir ce que deviendrait du bois dans l'eau surchauffée.

Des fragments de bois de sapin se sont transformés en une masse noire, douée d'un vif éclat, d'une compacité parfaite, ayant, en un mot, l'aspect d'une anthracite pure, et assez dure pour qu'une pointe d'acier la raye difficilement.

Cette sorte d'anthracite, bien qu'infusible, est entièrement granulée sous forme de globules réguliers de diverses dimensions, d'où il résulte clairement que la substance a été *fondue* en se transformant; elle ne donne par calcination que des traces de substances volatiles; la matière ligneuse y est donc arrivée à

[1] D'après l'examen qu'en a bien voulu faire M. de Sénarmont.

son dernier degré de décomposition. Cette matière, qui n'est donc que du carbone très-compacte, ne se consume qu'avec une excessive lenteur, même sous le dard oxydant du chalumeau; elle diffère des charbons formés à haute température, en ce qu'elle ne conduit pas l'électricité, non plus que le diamant.

Sa grande ressemblance avec celle de la nature.

Les filons d'argent qu'on voit à Kongsberg, en Norwège, encaissés dans le gneiss, renferment de l'anthracite qui présente la plus grande ressemblance avec cette anthracite artificielle; elle s'est moulée, au milieu de la chaux carbonatée et de l'argent natif, sous des formes qui annoncent qu'elle a aussi passé par un état de mollesse.

Formation du lignite et de la houille, dans des conditions analogues.

A des températures moindres et dans des conditions d'ailleurs analogues, le bois se transforme en une sorte de lignite ou de houille.

Produits voisins des bitumes naturels.

Dans ces expériences, j'ai obtenu, ainsi que je l'ai dit plus haut, des produits liquides et volatils ressemblant aux bitumes naturels et possédant jusqu'à leur odeur caractéristique.

Résumé sur l'action de l'eau surchauffée en présence des silicates.

En résumé, l'eau surchauffée a une influence très-énergique sur les silicates; elle en dissout un grand nombre, détruit certaines combinaisons à bases multiples, en fait naître de nouvelles, soit hydratées, soit anhydres; enfin elle fait cristalliser ces nouveaux silicates bien au-dessous de leur point de fusion. L'acide silicique mis en liberté dans ces dédoublements s'isole sous forme de quartz cristallisé.

Des transformations si complètes sont, d'ailleurs, obtenues par de très-faibles quantités d'eau. En général, on y distingue cette loi, que, vers le rouge naissant, la voie humide développe, en ce qui concerne la production des silicates, des affinités analogues à celles qui se manifestent par voie sèche, mais seulement à une température beaucoup plus élevée, et que de plus elle arrive à engendrer des combinaisons qui ne peuvent en aucun cas se former par cette dernière voie.

CHAPITRE V.

DÉDUCTIONS TIRÉES DES EXPÉRIENCES QUI PRÉCÈDENT, POUR L'EXPLICATION DE LA CRISTALLISATION DES ROCHES SILICATÉES, ÉRUPTIVES ET MÉTAMORPHIQUES.

Déduction des expériences, relatives à la cristallisation des roches éruptives.

Les résultats qui viennent d'être exposés permettent de se rendre compte de ce qui se passe dans la cristallisation des roches silicatées en général, tant éruptives que métamorphiques.

Examinons d'abord les premières et commençons par les laves.

Influence de l'eau sur la cristallisation des laves.

L'eau, quel qu'en soit l'état moléculaire dans les laves, intervient, pour les faire passer à l'état cristallin, à peu près comme dans les expériences de laboratoire, pour transformer l'obsidienne en feldspath cristallisé et déposer le pyroxène en cristaux parfaits. Dans l'un comme dans l'autre cas, l'eau paraît favoriser le départ de substances qui, sans sa présence, resteraient mélangées, et provoquer la cristallisation des silicates à une température bien inférieure à leurs points de fusion [1].

C'est aussi par l'influence de cette sorte d'eau-mère que les mêmes silicates peuvent cristalliser dans une succession qui est souvent opposée à leur ordre relatif de fusibilité. On sait, par exemple, que l'amphigène, silicate d'alumine et de potasse qui est infusible, s'est développé, dans les laves de l'Italie, en cristaux souvent très-volumineux, qui empâtent de nombreux cristaux de pyroxène, substance dont on connaît la fusibilité.

Séparation du quartz dans le granit et le porphyre.

Ces anomalies apparentes se présentent d'une manière encore plus frappante dans le granit, qui diffère de tous les produits de fusion sèche que nous connaissons, et on a cherché à s'en rendre

[1] Je rappellerai ici l'opinion de Dolomieu sur la cristallisation des laves : « Je le répéterai peut-être pour la centième fois, les laves compactes ne sont pas des vitrifications, et leur fluidité au sortir des volcans, laquelle se continue beaucoup plus longtemps que ne devrait le permettre leur refroidissement, est un effet très-singulier d'une cause qui n'est pas encore déterminée. » (*Journal des mines*, n° 37, p. 402, 1797.)

compte par diverses conjectures. On peut l'expliquer à peu près de la même manière; seulement, dans le granit, l'action de l'eau paraît, d'après les observations de M. Élie de Beaumont, avoir été, encore plus que dans les laves, aidée par quelques auxiliaires, tels que des chlorures et fluorures. Dans les porphyres feldspathiques quartzifères, l'eau a pu suffire seule pour donner naissance aux cristaux bipyramidés qui caractérisent cette roche. C'est encore là un phénomène de départ qui n'a aucun analogue dans les produits de la voie sèche.

Reproduction des principaux éléments du basalte.

La remarquable association de silicates anhydres et de silicates hydratés que présentent le basalte, le phonolithe et d'autres roches, n'a plus rien de surprenant, après les expériences dont je viens de rendre compte, car, dans la même opération et dans le même tube, j'ai obtenu des cristaux de pyroxène disséminés au milieu d'une zéolithe, c'est-à-dire simultanément deux éléments constitutifs du basalte.

Sorte de ramollissement aqueux éprouvé par le verre et probablement analogue à la mollesse primitive de certaines roches éruptives.

Une difficulté plus grande s'offrait encore, quand on considérait, d'une part, l'état de mollesse ou même de fluidité de certaines roches éruptives, et, d'autre part, leur faible chaleur primitive bien établie par diverses circonstances. Cette difficulté est encore levée, quand on considère ce qui s'est passé dans les mêmes expériences. Des tubes en verre, parfaitement réguliers, ont été retrouvés, après l'opération, gauchis, déformés, couverts d'ampoules, de manière à prouver qu'ils ont subi un véritable ramollissement. Il y a plus : quelquefois le tube a en quelque façon disparu ; il s'est transformé en une sorte de boue, présentant probablement une grande analogie, tant comme consistance que comme composition, avec l'état originaire de certaines roches éruptives.

Gonflement considérable du verre.

Il se produit ici un phénomène très-remarquable, et sur lequel j'aurai occasion de revenir : quoique le verre perde une partie de ses éléments en se transformant, il augmente considérablement en volume ; cette augmentation va à plus du tiers du volume primitif.

Quand on voit l'importance du rôle de l'eau dans les phénomènes que je viens de passer en revue, n'est-on pas conduit à lui attribuer aussi, à plus forte raison, le premier rôle dans les actions métamorphiques, surtout si l'on considère la grande étendue et la remarquable uniformité de ces actions?

Déductions concernant les roches métamorphiques.

Avant d'examiner ce dernier rôle de l'eau, il semble naturel de voir jusqu'à quel point sa présence a été possible dans les roches.

Existence de l'eau dans les roches.

Commençons par remarquer qu'il résulte des expériences déjà citées, qu'il ne faut qu'une quantité d'eau très-minime pour produire, dans des conditions de pression et de température convenables, des changements extrêmement prononcés. On ne saurait, en effet, voir sans étonnement qu'une transformation aussi complète dans l'état chimique et physique du verre soit obtenue par une quantité d'eau égale environ au tiers de son poids.

Faible quantité d'eau nécessaire pour réagir sur les silicates à une haute température.

Ceci fait comprendre que l'eau de constitution de certaines roches, telles, par exemple, que les argiles, ait suffi pour déterminer le métamorphisme, lorsque la température est venue lui donner le pouvoir de réagir sur les éléments auxquels elle était associée.

L'eau de constitution de certaines roches a pu suffire pour la production du phénomène.

Quant aux roches qui ne renferment pas d'eau de constitution, remarquons d'abord qu'aucune n'est dépourvue d'une certaine quantité d'eau, dite *eau de carrière*. On ne comprend pas que cette eau soit logée autrement que dans les pores de la roche. Toutes les roches sont donc poreuses, et ce qui se passe dans la coloration artificielle de l'agate prouve que les pierres, en apparence les plus compactes, peuvent être pénétrées par un liquide, en vertu de la seule force de la capillarité.

Eau de pénétration. Les roches les plus compactes sont poreuses.

On ne peut pas nier que, si l'eau parvient à s'insinuer, à l'aide de crevasses, dans le revêtement solide du globe, à une profondeur seulement égale à celle de la mer, elle y acquiert une pression de plusieurs centaines d'atmosphères, à l'aide de laquelle elle pénètre plus facilement dans les pores les plus ténus des roches, surtout à la température qu'elle possède à une semblable profon-

Son arrivée dans les roches est favorisée par la pression hydrostatique, qui peut être très-considérable, et par la capillarité.

deur. Cette action est sans doute aidée par la capillarité, dans des limites dont nous ne pouvons avoir aucune idée.

Attaque de proche en proche prouvée par l'exemple du verre.

Du reste, les roches fussent-elles tout à fait imperméables, dès que l'eau est douée de la faculté d'attaquer leur surface, il ne faut plus que du temps pour que son action se propage de proche en proche à des distances considérables. En effet, dans des tubes retirés prématurément, j'ai constaté que l'attaque avait lieu par couches successives, de sorte qu'il existait, au milieu de la paroi du verre, une partie transparente et tout à fait inaltérée.

L'eau peut produire, dans les terrains stratifiés le même ordre de phénomènes que dans les roches éruptives.

Ainsi, que l'eau des roches soit de constitution ou de pénétration, nous sommes en droit d'en attendre, dès que la température vient à s'élever convenablement, des actions comparables à celles qui se sont produites dans mes expériences aussi bien que dans les roches éruptives.

C'est, du reste, ce qui va être vérifié par un exemple aussi concluant que saisissant, qui abonde en faits nouveaux, et a le double mérite d'être contemporain et de s'être opéré dans des conditions aujourd'hui parfaitement connues.

CHAPITRE VI.

MÉTAMORPHISME CONTEMPORAIN DE PLOMBIÈRES.

Des zéolithes se sont produites dans toute une nappe de béton romain, sous l'influence de l'eau minérale.

Le béton que les Romains ont étendu à proximité des points d'émergence des sources thermales est composé de fragments de briques et de grès bigarré, sans mélange de sable, et cimenté par de la chaux. Il repose tantôt sur le granit lui-même, tantôt sur le gravier d'alluvion. J'ai reconnu que, sous l'action prolongée de l'eau minérale qui pénètre continuellement dans le massif de béton, le ciment calcaire et les briques ont été en partie transformés[1]. Les combinaisons nouvelles se montrent surtout dans les

[1] *Mémoire sur la relation des sources thermales de Plombières avec les filons métallifères, et sur la formation contemporaine des zéolithes.* (*Annales des mines*, 5e série, t. XIII, p. 227, 1858. *Bulletin de la Société géologique de France*, 2e série, t. XVI, p. 562.)

cavités de la masse, où elles forment des enduits mamelonnés et quelquefois cristallisés. Parmi ces produits, les plus remarquables par leur abondance sont des silicates de la famille des zéolithes, et notamment l'apophyllite, la chabasie et l'harmotôme.

Les briques sont intimement imprégnées de zéolithes.

A part la présence des zéolithes, qui ont cristallisé dans les boursouflures, les fragments de briques, qui font partie du béton romain, ont souvent acquis un aspect tout particulier; ils se sont imprégnés très-intimement de silicates semblables à ceux qui ont cristallisé dans les géodes; ils ont subi un véritable métamorphisme.

Conditions dans lesquelles cette transformation a eu lieu.

J'ai pu reconnaître avec précision toutes les conditions dans lesquelles ce métamorphisme a eu lieu.

Malgré sa dureté extrême, la maçonnerie romaine donne accès à l'eau thermale, tant par ses pores que par les fissures et les cavités qui s'y rencontrent. D'ailleurs la pression des sources force l'eau à circuler lentement dans sa masse, qui est ainsi, non-seulement baignée, mais encore *traversée* par l'eau minérale.

Importance d'un renouvellement continu dans des actions de ce genre.

Cette eau n'est donc pas stagnante; il y a *courant*. Ce courant est très-lent, il est vrai, mais il est continu. D'un autre côté, l'eau minérale de Plombières ne contient sans doute que de très-faibles quantités de matières salines (3 décigrammes par litre), qui se composent surtout de silice, potasse, soude, chaux et alumine; mais son renouvellement continuel et indéfiniment prolongé lui permet d'accumuler, en quantité très-notable, des dépôts de matières dont elle fournit en partie les éléments. C'est ainsi que des actions très-faibles se multiplient avec l'aide du temps. Cette circonstance d'un renouvellement continuel et prolongé manque dans la plupart des expériences tentées jusqu'à présent pour imiter la nature; mais son influence capitale sur certains phénomènes géologiques sera facilement comprise.

A la faveur des alcalis qu'elle renferme, l'eau des sources réagit graduellement sur certaines des substances qui constituent les masses qu'elle traverse, et peut-être même, sans qu'il y ait toujours véritable dissolution, mais seulement une sorte de cémen-

tation. Elle y engendre alors des silicates doubles hydratés, qui appartiennent au groupe des zéolithes, et qui sont dus à la réunion de ces deux circonstances, circulation de l'eau et réaction chimique.

Température peu élevée suffisante pour la cristallisation des zéolithes.

Pour que ces sortes de silicates se forment et cristallisent parfaitement, il n'est donc pas besoin, à beaucoup près, d'une chaleur aussi élevée qu'on l'a supposé; une température de 60 à 70 degrés, qui est celle des sources minérales de Plombières, suffit à la production au moins de certains d'entre eux. Les zéolithes ont, par conséquent, pu souvent se produire dans les roches sous la simple pression atmosphérique et à la surface même du sol. Il est remarquable de voir ces silicates cristalliser très-nettement par voie aqueuse, à une température où ils sont réputés insolubles dans l'eau.

Localisation des produits selon leur composition.

Sur des points rapprochés les uns des autres, à quelques millimètres d'intervalle, on voit se former des produits différents, selon la nature de la pâte sur laquelle l'eau réagit. C'est ainsi que l'apophyllite, silicate qui renferme de la chaux outre la potasse, s'est formée dans les cavités de la chaux; je ne l'ai jamais rencontrée dans la brique. C'est, au contraire, presque exclusivement dans les cavités de cette dernière, composée, comme on le sait, de silicate alumineux, que l'on trouve le silicate double d'alumine et de potasse, connu sous le nom de chabasie.

Les éléments des zéolithes n'étaient pas en totalité dissous dans l'eau.

Une même dissolution, en attaquant des roches de diverses natures, développe donc dans chacune d'elles des combinaisons spéciales. Une localisation aussi prononcée de ces zéolithes montre que leurs éléments n'étaient pas en totalité contenus dans l'eau qui imbibait la maçonnerie; celle-ci n'en apportait qu'une partie : les éléments complémentaires, chaux, alumine ou autres, nécessaires à la constitution des nouveaux composés, étaient renfermés, soit dans le mortier, soit dans les briques, qui les ont abandonnés à la réaction de l'eau.

Absence de zéolithes dans la nappe de gravier sur laquelle s'étend le béton.

Tandis que la couche de béton abonde en zéolithes, le gravier d'alluvion sur lequel s'étend la maçonnerie ne présente aucun indice de la formation de ces silicates, bien que l'eau thermale le traverse avant d'arriver au béton. Cette dernière se borne à

déposer, dans les interstices des galets, une masse argileuse jaunâtre, qui n'est autre qu'une de ces substances mal définies que l'on a désignées sous le nom d'argiles chimiques ou d'halloysites. Ce contraste confirme bien cette conclusion, que les zéolithes ne sont pas un dépôt immédiat de l'eau thermale, mais qu'elles se produisent seulement par la réaction de cette eau minéralisée sur d'autres silicates.

Analogie des minéraux rencontrés dans les maçonneries de Plombières avec ceux que renferment diverses roches éruptives.

Le travail qui se produit à Plombières s'est évidemment accompli sur des proportions considérables dans certaines formations géologiques.

L'ensemble des minéraux disséminés dans les innombrables cellules de la maçonnerie, les zéolithes, l'opale, l'arragonite, constituent une association qui forme fréquemment l'apanage de certaines roches éruptives. Il y a plus : toute la manière d'être de ces minéraux contemporains rappelle, dans les moindres circonstances, leur disposition dans les nappes de basalte et de trapp douées de la structure amygdaloïde. Si ce n'était la différence de couleur, il serait même très-possible de confondre les parties de béton chargées de zéolithes avec des tufs basaltiques où se sont formés les mêmes minéraux; les briques, avec leurs boursouflures et leurs druses, imitent d'une manière surprenante les roches amygdaloïdes. Une telle identité dans les résultats décèle incontestablement de grandes analogies d'origine.

Ressemblance frappante avec la palagonite.

Dans le voisinage des roches volcaniques de l'Etna, de l'Islande et d'autres contrées, on rencontre une roche à laquelle on a donné le nom de *palagonite*[1]. Ce silicate hydraté, facilement fusible, faisant gelée avec les acides, d'un aspect souvent résineux, a tous les caractères des silicates du béton de Plombières, et, selon toute probabilité, résulte d'une transformation semblable à celle qui a donné naissance à ces derniers.

[1] Cette roche a été observée d'abord par M. Sartorius de Waltershausen, par M. Bunsen et par M. Sandberger. (Voir Rammelsberg, *Chemische Mineralogie*, 3e et 5e supplément, p. 73 et 185.) M. Delesse en a aussi donné une analyse. (*Annales des mines*, 5e série, t. XII, p. 474.)

Mais c'est surtout aux phénomènes du métamorphisme que nous avons à comparer les résultats de l'action des sources de Plombières.

CHAPITRE VII.

CONSÉQUENCES À TIRER DES FAITS RECONNUS À PLOMBIÈRES.

Deux conséquences remarquables déduites des faits qui se passent à Plombières.

1re conséquence : Formation des minéraux sur place par une sorte de fécondation.

On a dit avec raison qu'il est peu de substances insolubles, lorsque les dissolvants circulent par millions de litres. Cependant il ne faudrait pas conclure de là que les minéraux insolubles, formés par l'eau dans le sein des roches, y ont été purement et simplement déposés par elle à la suite d'une action séculaire; car un des faits les plus nouveaux et les plus importants que révèle ce qui se passe à Plombières, c'est que l'eau peut n'apporter avec elle qu'une petite partie des éléments des minéraux qu'elle semble déposer en entier. Les autres éléments préexistaient dans la roche : paraissant obéir à une tendance énergique à la cristallisation, ils saisissent en quelque sorte les premiers au passage, selon leurs affinités, et le minéral est pour ainsi dire formé sur place.

2e conséquence : Commune origine des filons et des minéraux métamorphiques.

Il en est tout autrement des filons métallifères, presque entièrement composés de substances étrangères à la roche qui les contient; mais, en les trouvant à Plombières, sur un même point avec les minéraux métamorphiques, on ne peut s'empêcher d'y voir un effet différent de la même cause qui a produit ces derniers.

Analogie entre les minéraux de Plombières et ceux des roches métamorphiques.

Il y a une analogie frappante entre la production des silicates cristallisés du béton de Plombières et la formation des silicates qui se trouvent dans une foule de roches métamorphiques : tels sont la wernérite, le grenat, le feldspath, le pyroxène, dans des calcaires souvent à peine modifiés; la mâcle ou la staurotide, dans des schistes argileux. La production du mica dans les roches n'est pas plus difficile à comprendre que celle de l'apophyllite du béton de Plombières, qui est aussi un silicate fluorifère.

Qu'une dislocation vienne à faire naître un groupe de sources thermales, n'est-il pas probable que la plupart des terrains traversés par ces sources subiront une action dont ce qui s'est passé à Plombières donne une idée? Cette action s'étendant de proche en proche avec l'aide du temps, occasionnerait le métamorphisme sur des zones d'une assez grande étendue.

Un groupe de sources thermales peut produire le métamorphisme dans tout un pays.

A Plombières, avant que la vallée, en s'échancrant, donnât issue aux sources, l'eau thermale arrivait déjà de la profondeur [1], et si elle paraissait à la surface, ce n'était sans doute que par une sorte de transsudation peu apparente. En s'épanchant dans les couches inférieures du grès bigarré qui sont en contact avec le granit, elle y déposait du jaspe, du quartz cristallisé et divers autres produits. Ainsi, des eaux circulant à l'intérieur peuvent causer une action métamorphique très-énergique, sans que leur existence se trahisse à la surface par des sources thermales. Il est probable que, dans bien des cas, la silicification des polypiers et du bois de certaines couches, la précipitation dans d'autres de quartz cristallisé, tel que celui qu'on trouve dans le bassin tertiaire de Paris, la silicification complète de quelques couches primitivement calcaires [2] n'ont pas une autre origine.

Action latente du métamorphisme.

Il a suffi d'une eau tiède et à peine minéralisée pour transformer cette maçonnerie et y faire naître des silicates hydratés et cristallisés. Les effets ne seraient-ils pas bien plus considérables encore si l'eau, fortement surchauffée, et cependant retenue par la pression des masses supérieures, circulait lentement à travers certaines roches, comme elle le fait dans le béton de Plombières, et réagissait sur elles avec la haute température qui convient à la formation des silicates anhydres?

[1] Voir le Mémoire sur Plombières cité plus haut. (*Annales des mines*, 5e série, t. XIII, p. 232.)

[2] Comme les couches de muschelkalk silicifié qui bordent la faille limite des Vosges, à Orschwiller et Truttenhausen. (Daubrée, *Description géologique du Bas-Rhin*, p. 325 et 326.)

CHAPITRE VII.

[illegible] DE MÉTAMORPHISME EXPLIQUÉES [illegible] DANS LES CHAPITRES V ET VI.

[illegible] les [illegible] et [illegible] [illegible]

En rapprochant les résultats obtenus par les expériences dans leur ensemble des données acquises par l'examen des phénomènes contemporains de l'histoire, on peut expliquer la majeure partie des faits du métamorphisme : je me bornerai à mentionner brièvement quelques exemples à la suite de ceux dont j'ai parlé plus haut.

[illegible] et [illegible] dans les calcaires secondaires [illegible] de la Somma

Je rappellerai d'abord le développement bien connu du pyroxène et de l'amphibole dans les calcaires secondaires des îles Hébrides ou des Pyrénées, et la production déjà citée de minéraux variés dans les blocs de calcaire de la Somma, dont les géodes sont incrustées de cristaux de diopside, de mica et d'autres substances.

Développement du feldspath dans [illegible]

Un des phénomènes fréquents dans les roches métamorphiques, c'est le développement du feldspath dans leur masse. Parmi les nombreux faits de ce genre, on connaît les schistes argileux qui sont souvent parsemés de feldspath, non-seulement dans le voisinage du granit (Bretagne, Saxe, etc.), mais aussi dans des massifs près desquels ne se montre aucune roche éruptive (Taunus, Ardennes, etc.). Dans le terrain carbonifère des Vosges, à Thann, par exemple, des couches bien régulières de grauwacke sont parsemées de cristaux de feldspath qui se sont isolés d'une pâte pétrosiliceuse; les végétaux fossiles que renferme la roche empêchent, d'ailleurs, de la considérer comme un porphyre. Des calcaires du massif du Mont-Blanc, signalés déjà par M. Brochant, et que M. Brongniart a nommés *calciphyre feldspathique*, offrent des particularités analogues; on ne doit, d'ailleurs, pas perdre de vue qu'ici, comme dans d'autres cas du même genre, le calcaire, en se modifiant ainsi, n'a pas toujours échangé sa compacité primitive contre l'état cristallin.

Parmi les associations si fréquentes des silicates anhydres aux silicates hydratés, je citerai seulement les roches chloritiques qui forment la gangue de la tourmaline, de l'amphibole, du pyroxène, etc. Les cristaux de feldspath adulaire des Alpes, qui sont pénétrés de chlorite (Pfitsch, en Tyrol), quelquefois même de stilbite (Sella, au Saint-Gothard), apprennent que les silicates anhydres ont pu même quelquefois cristalliser après les silicates hydratés[1].

Association de silicates hydratés à des silicates anhydres.

Le quartz s'est isolé, au milieu des roches silicatées, sous des formes très-variées. Les roches granitiques et certains porphyres le renferment en grains ou en cristaux isolés. Dans les roches schisteuses, il est tantôt sous forme de veines ou de lames très-minces logées entre les feuillets, d'une régularité d'épaisseur et de parallélisme surprenante, comme dans les micaschistes, schistes chloritiques et talqueux, leptinites, phyllades, etc. tantôt sous forme de veines qui coupent nettement les feuillets, tout en se rattachant à eux. Quelquefois enfin le quartz constitue des masses considérables à l'état grenu, telles que les roches (itacolumites) qui, au Brésil, sont associées à l'or et au diamant.

Isolement du quartz dans les roches silicatées.

Dans la plupart de ces cas, le quartz paraît résulter de la décomposition de silicates, de même que dans mes expériences, où il se produit de diverses manières. Ainsi, le quartz, qui, sous tant de formes, fait partie des roches éruptives et des roches métamorphiques, doit être considéré, tout aussi bien que celui des filons, comme un témoin de la voie humide[2].

Le quartz est un témoin de la voie humide.

On sait, en effet, que la silice à l'état vitreux, que l'on obtient par la fusion du quartz, n'a aucune des propriétés de ce dernier minéral; qu'elle n'est ni aussi dense, ni aussi réfringente, ni

[1] Bien que la chlorite n'ait pas encore été imitée, on peut croire, d'après ses analogies chimiques avec les zéolithes, aussi bien que par sa fréquence dans des terrains qui n'ont subi qu'un commencement de modification, comme les terrains schisteux des Ardennes, qu'elle a pu se former à une température assez peu élevée.

[2] Mes expériences confirment ainsi pleinement les vues que MM. Schafhaütl et Bischof avaient émises sur ce sujet.

aussi dure, ni aussi réfractaire aux réactifs alcalins[1]. Il est même possible que cette différence de propriétés soit la cause de la décomposition facile des silicates vitreux : les menstrues en attaquent la silice sous sa modification soluble; puis, sans qu'il soit besoin peut-être que les circonstances changent, ils la précipitent sous la modification correspondant au quartz insoluble, ne servant alors, pour ainsi dire, qu'à faire passer la silice, par une sorte d'évolution continue, d'un état moléculaire à l'état moléculaire opposé[2].

Le métamorphisme a pu avoir lieu, même très-près de la surface.

Ce qui se passe dans les expériences d'eau surchauffée se joint à l'exemple des calcaires si chargés de minéraux qui ont été rejetés des profondeurs de la Somma, pour faire regarder la température et la pression comme indispensables à la production d'un métamorphisme énergique. D'un autre côté, un métamorphisme intense s'est développé quelquefois près de la surface, comme au Brésil, où les schistes cristallins et gemmifères s'étendent sur plus de douze cents kilomètres de longueur. Il semble y avoir contradiction entre ces deux faits. Toutefois, lorsque de l'eau surchauffée est poussée des profondeurs vers la surface, à travers la substance ou les fissures à peine ouvertes d'une roche, il faut bien remarquer que les lois de la pression hydrostatique ne lui sont pas applicables, comme elles le seraient à de l'eau remontant librement dans une crevasse. On comprend facilement que, dans le premier cas, sa pression, et par conséquent sa température, puissent se conserver en quelque sorte comme en vase clos, jusqu'à quelques mètres de la surface.

Il est donc possible que beaucoup d'actions, telles que la cristallisation du granit, celle de certains amas stannifères qui ren-

[1] M. Henri Rose a récemment publié un mémoire sur ce sujet. *Ueber die verschiedene Zustände der Kieselsaüre.* Pogg. *Annalen,* 1859.

[2] L'acide stannique présente quelque chose de semblable, quand on voit l'une de ses modifications (acide stannique proprement dit) passer par la simple action de la chaleur à l'autre état de modification (acide métastannique), et se séparer ainsi de certains dissolvants.

ferment les mêmes minéraux que les roches du Brésil, aient eu lieu sous pression, bien qu'à une très-faible profondeur.

Il a même quelquefois été plus prononcé près de la surface que dans la profondeur.

Il est probable que certains minéraux, par exemple les silicates anhydres, ne se produisent facilement dans l'eau qu'à des températures déterminées. Une chaleur trop élevée, aussi bien qu'un manque de chaleur, nuit à leur formation. D'ailleurs l'expérience semble nous faire voir que les feldspaths tantôt se produisent, tantôt se détruisent dans l'eau, selon les températures. C'est probablement parce que, dans certaines régions des Alpes, telles que les Grisons, les parties supérieures présentaient seules la température convenable, que le métamorphisme et les minéraux variés, qui sont en quelque sorte ses témoins, s'y sont produits plutôt que dans les couches situées plus bas et dont on peut suivre la coupe dans d'immenses déchirures[1]. Ce fait, dans tous les cas bien singulier, serait analogue à la condensation du sel ammoniac, de divers chlorures, du soufre et du fer oligiste, dans les couches superficielles des montagnes volcaniques et des laves, ou à l'enrichissement bien connu qu'offrent de nombreux filons métallifères dans leur région supérieure.

Résumé des avantages de la voie humide sur la voie sèche pour l'explication de la formation des roches silicatées.

En résumé, quand il s'agit d'expliquer l'origine et la formation des silicates dans la plupart des roches, ce n'est pas à la voie sèche, mais bien à la voie hydrothermale qu'il faut recourir le plus souvent. Cette assertion s'appuie sur les considérations qui suivent :

1° Température moins élevée.

1° La formation par voie humide a lieu à des températures incomparablement plus basses que le point de fusion; c'est une condition dont on a précédemment reconnu la nécessité.

2° Associations de minéraux.

2° Les silicates hydratés, qui se montrent dans la nature souvent associés à des silicates anhydres, se forment facilement, par la voie humide, comme on l'a vu, en même temps que ces derniers (zéolithes avec pyroxène, schiste chloritique avec tourmaline, etc.); leur réunion s'expliquerait bien difficilement par la voie sèche.

[1] Ce fait, qui résulte d'observations inédites et anciennes de M. Élie de Beaumont, a été signalé récemment aussi par sir Roderick Murchison.

3° Abondance du quartz.

3° Le quartz est excessivement abondant dans la nature. Or, la grande facilité avec laquelle l'eau surchauffée décompose certains silicates, solubles ou insolubles, et en isole du quartz dès qu'elle se trouve en contact avec eux, rend parfaitement compte de cette abondance, ainsi que du mode de dissémination de ce minéral dans beaucoup de roches silicatées, métamorphiques ou éruptives, auxquelles il est généralement associé, comme un produit de sécrétion.

4° Mode d'enchevêtrement des minéraux.

4° Enfin, au lieu de masses uniformes, comme la fusion en produit en général, nous voyons dans les produits de la voie humide des mélanges de substances cristallisées différentes, dont le mode d'enchevêtrement est tout à fait indépendant, de même que dans la plupart des roches, de leurs degrés respectifs de fusibilité.

CHAPITRE IX.

APPLICATION DES MÊMES FAITS AUX ROCHES ÉRUPTIVES.

Ressemblance minéralogique entre les roches éruptives et les roches métamorphiques.

Les roches éruptives présentent une grande analogie de composition avec les roches métamorphiques; beaucoup de minéraux sont, en effet, communs aux unes et aux autres.

C'est ainsi que les éléments du granit (feldspath, mica et quartz) imprègnent souvent les couches qu'il a traversées et où ils se sont comme extravasés[1]. Quand le granit et la syénite ont empâté des fragments des roches préexistantes, ils se les sont même en quelque sorte assimilés, comme je l'ai montré ailleurs[2]. On trouve un exemple non moins remarquable de cette analogie dans les masses de calcaire compacte de la Somma, dans l'intérieur desquelles l'amphigène, la sodalite, l'anorthite ont cristallisé, tout aussi bien que dans les laves qui les avoisinaient. Le calcaire du Kaiserstuhl, avec son fer oxydulé titanifère, son pyrochlore, sa perowskite et son apatite, manifeste bien aussi son

[1] D'après de nombreuses observations de MM. Élie de Beaumont, de la Bêche, Gruner, Naumann et beaucoup d'autres.

[2] Observations sur le métamorphisme. (*Annales des mines*, 5e série, t. XII.)

lien de parenté avec la roche doléritique qui lui a fourni les principaux éléments de ces minéraux.

C'est sur cette ressemblance de composition, parfois frappante, qu'on s'est souvent appuyé pour conclure que les minéraux des roches métamorphiques ont été produits par voie sèche.

Cette analogie a servi d'argument en faveur de l'action de la voie sèche dans le métamorphisme.

Je retournerai le raisonnement, en disant que si des composés, tels que le feldspath, le mica, le quartz, l'amphigène, le pyroxène, etc. se rencontrent au milieu des roches stratifiées, dans des conditions où ils n'ont pu y être formés que par l'intervention de l'eau, on doit regarder comme très-probable que l'eau a agi de la même manière dans la cristallisation des roches éruptives elles-mêmes, conclusion à laquelle nous avons été amenés précédemment, par d'autres considérations.

Le raisonnement doit être retourné; il confirme l'action de la voie humide dans les roches éruptives.

S'il fallait émettre une hypothèse sur cette singulière association de l'eau à des roches éruptives douées d'une haute température, on serait porté à voir dans ce phénomène une sorte de fusion aqueuse rendue quelquefois persistante par la pression. Quand ces silicates ont cristallisé, leur eau mère, accompagnée de substances variées [1], s'en est dégagée en conservant parfois une température et une pression assez considérables pour pénétrer dans les roches encaissantes et les modifier profondément. De là résultent peut-être les analogies qui ont été signalées plus haut, entre la roche éruptive et la roche traversée. Ainsi, pour résumer et suivre jusqu'au bout le rôle qu'on est amené à attribuer à l'eau dans les roches éruptives, je dirai qu'on peut lui reconnaître trois actions principales qu'elle exerce sous trois états:

Observations sur l'état de l'eau dans les roches éruptives.

1° Arrivant combinée à ces roches dont elle cause, concurremment avec la chaleur, l'état de mollesse;

2° Se dégageant de ces roches, à mesure de leur consolidation, traversant et métamorphisant les roches voisines;

3° S'échappant parfois jusqu'à la surface du sol, soit à l'état de vapeur, soit à l'état de sources thermales [2].

[1] Comme les chlorures de laves.

[2] Ce sont là ces sources dont les filons métallifères et divers dépôts voisins des

L'extravasement de certains minéraux dans les masses encaissantes n'est qu'apparent.

Remarquons, toutefois, que l'extravasement de minéraux tout formés, dont j'ai parlé plus haut, n'est sans doute qu'une apparence, et que le feldspath ou le mica qui avoisine le granit s'est plus probablement formé sur place en empruntant, aussi bien qu'à Plombières, une partie de ses éléments au milieu dans lequel il se développait.

Vicissitudes du pyroxène.

C'est ici le lieu de dire en passant la singulière destinée du pyroxène. Les cristaux de pyroxène si fréquemment disséminés dans les laves avaient été autrefois considérés comme détachés d'une roche préexistante, et, pour mieux exprimer l'idée déjà émise par Dolomieu, qu'ils n'ont pas été formés dans les roches volcaniques qui les renferment, mais qu'ils y ont été simplement empâtés, Haüy donna au pyroxène son nom dans le sens *d'étranger au feu*[1]. Plus tard, surtout depuis les expériences de MM. Berthier et Mitscherlich, on a reconnu qu'il avait, au contraire, cristallisé dans les laves, et on l'a considéré comme le produit type et exclusif de la voie sèche. N'est-il pas étrange de voir que, par sa grande tendance à se former dans l'eau surchauffée, ce soit lui qui paraisse aujourd'hui le premier parmi les produits les mieux caractérisés de cette nouvelle voie ?

L'éruption de certaines roches a pu être causée par un foisonnement.

Ajoutons encore que l'eau a pu avoir son influence, même dans les actions mécaniques des roches éruptives. En effet, dans la relation de mes expériences, j'ai insisté à dessein sur l'augmentation de volume qu'a prise le verre transformé en zéolithe par l'action de l'eau, pour en conclure d'une manière extrêmement probable qu'au moment de leur hydratation certaines roches ont dû éprouver un phénomène de foisonnement, analogue à celui dont on a de nombreux exemples naturels dans le changement de l'anhydrite en gypse. Ce foisonnement a dû suffire, dans bien des cas,

roches éruptives attestent fréquemment l'existence. Elles ont dû, avec le temps, diminuer de température et de volume, et ont fini par se tarir, quand les masses d'où elles naissaient sont arrivées à leur dernier état de consolidation et de refroidissement.

[1] « Le nom de pyroxène avertit que les cristaux des laves ne sont pas dans leur lieu natal. » (*Minéralogie de Haüy*, 1re édition, t. III, p. 90.)

à donner naissance à la poussée et à l'éruption des roches; ce serait particulièrement le cas des phonolithes et des basaltes.

CHAPITRE X.

MÉTAMORPHISME DE STRUCTURE; SES RELATIONS AVEC LE MÉTAMORPHISME ORDINAIRE.

Nous avons vu dans la première et dans la deuxième partie de ce travail que la structure schisteuse paraît être un effet de pressions et glissements subis par les couches sous l'action de forces énergiques.

Nouvelles expériences sur la production de la structure schisteuse par compression.

Des expériences que j'ai entreprises sur ce sujet avant d'avoir connaissance de celles de M. Tyndall, mais que j'ai faites par d'autres procédés et sur une plus grande échelle, confirment cette manière de voir.

Procédés employés.

J'ai utilisé pour cela des moyens de compression puissants, non-seulement des cylindres lamineurs, mais des presses à balanciers mues par la vapeur qui servent dans la fabrication de la casserie, pour emboutir la tôle sous forme d'ustensiles variés. Tous ces modes de compression, graduelle ou par chocs, ont été successivement employés. La matière sur laquelle j'ai principalement agi était de l'argile amenée à un état particulier de dessiccation [1].

Deux conditions nécessaires.

L'argile soumise à ces divers procédés de compression peut acquérir une structure schisteuse très-prononcée [2]; mais pour cela, outre la pression, deux conditions sont indispensables.

1° Il faut qu'il y ait glissement. Expérience qui le prouve.

1° Il faut que la substance puisse éprouver des glissements et s'étendre par un commencement de laminage; alors les feuillets se développent parallèlement au glissement, c'est-à-dire normalement à la pression.

[1] Ces expériences ont eu lieu à l'usine de MM. Karcher et Westermann, à Ars-sur-Moselle. Je me suis surtout servi de l'argile réfractaire de Villy-en-Trode (Aube), qui provient du terrain néocomien et des marnes grises supraliasiques.

[2] Certaines tuiles, obtenues par un procédé particulier de moulage qu'on emploie à Épinal, prennent souvent aussi un commencement de structure feuilletée.

On n'obtient aucun résultat si le corps ne peut pas céder et se déformer dans le sens perpendiculaire à la pression. Un morceau d'argile de forme cylindrique, enchâssé exactement dans un anneau en fonte, de même forme et de même dimension, a été très-fortement comprimé par un piston de même calibre. La substance a acquis une forte consistance, mais sans montrer aucun indice de feuillets, ni même de clivage. Je répéte que cela n'a lieu qu'autant que la masse de terre s'emboîte exactement dans son enveloppe rigide; autrement il s'opère des déformations et par suite un feuilleté.

2° La masse comprimée doit être douée d'un degré particulier de plasticité.

2° La masse que l'on comprime doit être douée d'un degré particulier de plasticité. Trop sèche, elle se brise; trop molle, elle se lamine, sans que les feuillets puissent s'isoler. Des échantillons de la même argile, mais à des états de dessiccation différents, soumis simultanément à la compression, fournissent des couches superposées, les unes à structure schisteuse, les autres à cassure irrégulière, dont le contraste est très-significatif.

Essai sur des laitiers au moment de leur solidification.

J'ai également cherché à produire, par les mêmes procédés, la structure schisteuse dans les silicates au moment où ils passent de l'état de fusion à l'état solide. Des laitiers de hauts fourneaux à fer, que j'ai soumis à la pression pendant qu'ils étaient encore pâteux, ne sont pas devenus schisteux. La cassure de la masse refroidie montrait seulement des veines diversement colorées et alignées normalement à la pression.

Le passage de la structure schisteuse à la structure massive dans les roches s'explique par ces expériences.

Ce que j'ai dit plus haut sur l'influence du degré de plasticité sur la formation des feuillets fait comprendre les transitions fréquentes que l'on observe dans un même massif de roches partiellement schisteuses. C'est ainsi, pour n'en citer qu'un exemple, que le porphyre de Mairus, près de Deville, dans les Ardennes, devient graduellement schisteux.

Schistosité du verre manifestée par les expériences faites dans l'eau surchauffée.

Il convient de rappeler ici comment le verre acquiert une schistosité très-remarquable, par des causes toutes différentes de celles dont nous venons de parler. En même temps que le tube de verre transformé par l'eau surchauffée se gonfle considéra-

blement, il prend cette structure schisteuse d'une manière très-prononcée. Les feuillets dans lesquels il se clive facilement sont si minces, qu'on peut quelquefois en distinguer plus de dix dans un millimètre d'épaisseur[1]. Quand le verre est incomplétement attaqué, le centre, quoique vitreux encore, montre aussi des zones très-fines, comme les agates onyx. Le tout rappelle la manière d'être de certaines roches schisteuses et cristallines.

La schistosité qu'acquièrent les tubes du verre est un effet évident du mode de fabrication, qui a imprimé à la masse une structure par couches superposées; c'est une sorte d'hétérogénéité qui peut être décélée à l'aide de l'action subtile de la lumière polarisée, mais qui, pour l'œil nu, est primitivement cachée sous une apparente homogénéité. Elle apparaît quand l'eau, par une action inégale, a dessiné les zones de nature différente, et, mieux encore, après que la substance, déjà modifiée en partie, a subi un retrait. Ces feuillets sont, en effet, beaucoup plus prononcés dans certains tubes que dans d'autres. Preuve manifeste d'un fait dont on trouverait divers exemples dans l'industrie[2], et qui montre comment la disposition primitive des matériaux constitutifs d'une roche, quoique ayant disparu par des actions ultérieures, peut cependant s'y trouver encore à l'état latent, et se révéler dès que des influences nouvelles la mettent au jour[3].

En quoi consiste le parallélisme des éléments cristallins.

Un phénomène accompagne presque toujours la structure schisteuse dans les roches cristallines, c'est le parallélisme remarquable que présente une partie de leurs éléments cristallisés. Ceux qui

[1] Parfois ils se détachent aussi nettement les uns des autres que les feuillets d'un cahier de papier à lettres.

[2] On sait, par exemple, que, dans le façonnage des pièces de terre à porcelaine, l'ébaucheur au tour et le mouleur doivent apporter une grande attention pour produire une pression *égale* sur toutes les parties de la pièce qu'ils exécutent. De très-faibles inégalités de compression, d'abord complétement insensibles, se trahissent, après la cuisson, par une foule d'irrégularités, dont certaines sont connues sous le nom de *vissage*. (Brongniart, *Arts céramiques*, t. I, p. 123.) La fabrication des miroirs chinois à images paraît reposer sur un principe du même genre.

[3] Des expériences que j'ai exécutées récemment font ressortir la structure schisteuse dans un métal aussi peu disposé, ce semble, à l'acquérir que le laiton.

ont la forme de paillettes, quelle qu'en soit la nature, mica, chlorite, talc, graphite ou fer oligiste, sont disposés à plat, suivant les plans des feuillets; quelquefois même ils y présentent cette sorte d'alignement que l'on a nommé *parallélisme linéaire*, et qui est comme l'effet d'un étirement. Les schistes chloritiques, micacés, talqueux, offrent les exemples les mieux caractérisés de ce phénomène.

Les minéraux en paillettes ont été considérés comme cause de la structure feuilletée.

C'est même à ces paillettes, qui étaient supposées prendre une disposition dans des plans parallèles, sous l'influence d'actions calorifiques ou magnétiques, qu'on a souvent attribué, avec sir John Herschel[1], la cause de la structure feuilletée. M. Sorby a cherché à confirmer cette influence des paillettes par une expérience qui consiste à laminer une masse pâteuse qui en renferme.

La structure feuilletée leur préexistait, et a, au contraire, causé leur alignement.

Je ne saurais partager cette manière de voir, et je pense que l'alignement des paillettes, au lieu d'être la cause, n'est au contraire que la conséquence de la préexistence des feuillets[2].

Je m'appuie pour cela sur quatre motifs principaux :

1° La structure feuilletée s'est quelquefois développée dans la nature, et je l'ai produite parfaitement dans l'expérience précédemment citée, en l'absence de toute espèce de paillettes.

2° Des cristaux qui sont loin d'avoir la forme de lamelles, comme le grenat, le fer oxydulé, présentent cependant un alignement très-régulier.

3° J'ai reconnu, dans des expériences semblables à celles de M. Sorby, que les paillettes ont bien une tendance à venir se ranger graduellement dans le sens du mouvement déterminé par la pression, de manière que le frottement dû au glissement soit le moindre possible. Cependant, leur alignement est très-imparfait, en comparaison de celui de la nature, souvent si remarquable par sa régularité; et celles de ces paillettes qui ne parviennent

[1] Tous les minéraux des roches schisteuses ne présentent pas cet alignement; ainsi les mâcles ne sont pas, en général, orientées parallèlement aux feuillets des phyllades dont elles font partie.

[2] Lyell, *Manuel de géologie*, 1857, t. II, p. 447.

pas à se ranger dans le plan général paraissent contrarier la formation des feuillets.

4° Un procédé m'a donné des résultats presque identiques à ceux de la nature : il consiste à imprégner, avant de la soumettre au laminage, de l'argile avec de l'eau à 100 degrés, qui a été saturée d'acide borique; puis de la laminer sur une plaque de fonte échauffée par un foyer, de façon à éviter que l'acide se précipite avant la formation des feuillets. Or, dans cette expérience, les paillettes d'acide borique qui prennent naissance entre les feuillets par le refroidissement ultérieur du liquide présentent un alignement infiniment plus régulier que dans celle de M. Sorby, et tout à fait comparable à celui de certains schistes micacés [1].

Dans tous les cas, l'alignement des paillettes est facile à concevoir comme une conséquence du fait auquel nous l'attribuons. Si, par exemple, les matériaux, béton ou briques, dans lesquels pénètrent les sources de Plombières, avaient une structure feuilletée, n'est-il pas évident que le mode de circulation de l'eau en serait influencé, et que les veines liquides, en s'insinuant de préférence entre les feuillets, donneraient naissance, sur leur passage, à des cristaux en lamelles ou autres, sensiblement alignés? Dans le cas même où l'eau, au lieu de pénétrer du dehors, aurait été renfermée dans la masse comme eau de constitution, on comprend encore que les cristaux auraient dû se développer en profitant des plans de clivage de la masse, et suivant ces plans.

La disposition papyracée, si surprenante par sa régularité, que prend le quartz dans certains leptinites et porphyres, a pu avoir une origine analogue, puisque, comme nous l'avons vu, l'eau paraît être intervenue aussi dans la cristallisation des roches éruptives.

[1] Je ne prétends pas dire toutefois que, dans certains cas, le laminage n'ait pas continué après l'alignement des paillettes dans les roches; on peut même se convaincre du contraire en examinant diverses roches schisteuses cristallines.

CHAPITRE XI.

RAPPROCHEMENT DE TOUS LES PHÉNOMÈNES DONT LE SIÉGE EST DANS LA PROFONDEUR.

Familles de sources thermales.

Si les sources thermales sont des agents du métamorphisme, il ne faut pas s'étonner qu'un même mode de métamorphisme s'étende sur des régions considérables, puisque nous voyons encore aujourd'hui les eaux minérales se grouper par familles de composition analogue, dans des régions d'assez grande étendue; ainsi elles sont généralement carbonatées dans l'Auvergne et dans l'Eifel, sulfureuses dans les Pyrénées[1], etc.

Familles de dépôts métallifères.

On rencontre ces analogies plus caractérisées encore dans les gîtes métallifères, qui paraissent être aussi un produit d'origine semblable, et, bien que la plupart d'entre eux présentent de nombreuses espèces minérales, souvent même distribuées d'une manière très-inégale dans les diverses parties d'un même filon, la nature des gangues, aussi bien que celle des métaux, qu'il est possible d'y exploiter utilement, montre que généralement ils se groupent par systèmes. Ces systèmes embrassent quelquefois des régions considérables, surtout dans les continents dont la structure géologique n'est pas morcelée comme celle de l'Europe occidentale. (Exemples : les groupes argentifères du Mexique, les grandes bandes aurifères des Alleghanys et du Brésil, la zone stannifère de la Malaisie.)

Familles de volcans avec leurs tremblements de terre.

Le même fait est bien connu pour les volcans; s'il en est d'isolés, la plupart constituent des *séries*, comme M. de Buch l'a depuis longtemps signalé quand il les compare à des soupiraux ayant pris naissance sur une même grande faille. Quant aux tremble-

[1] M. Longchamp a remarqué depuis longtemps que, sur toute la longueur de cette chaîne de montagnes, qui dépasse 360 kilomètres, il y a plus de cent cinquante sources, toutes de même nature, et ne différant que dans des limites fort étroites, par la proportion de leurs éléments. (Mémoire lu à l'Académie des sciences, 12 août 1833.)

ments de terre, nous ne les mentionnerons que pour les rattacher aux volcans, auxquels ils semblent si intimement liés.

Leur étendue comparée à celle des zones métamorphiques.

Les familles de sources thermales, de filons métallifères, de volcans, avec leurs tremblements de terre, occupent des étendues tout à fait comparables à celles que nous avons reconnues au métamorphisme régional, et dont le siége occupe des contrées entières.

Relation des phénomèmes métamorphiques avec les dislocations.

De même que toutes ces familles, les terrains métamorphiques[1] sont confinés exclusivement, comme on l'a déjà fait remarquer, dans les régions disloquées. D'une part, en effet, les terrains stratifiés les plus anciens de la Russie et de la Suède méridionale, comme ceux de l'Amérique du Nord, qui ont conservé leur horizontalité première, ne sont pas sensiblement modifiés. D'autre part, des terrains récents, mais fortement accidentés dans leur stratification, tels que les couches jurassiques et crétacées des Alpes, des montagnes Apuennes et de la Toscane, se montrent, au contraire, complétement transformés, lors même qu'on n'y rencontre que peu de masses éruptives. Les phyllades qui ne sont que le premier terme de transformations plus profondes, ne se trouvent jamais en dehors de zones autrefois plus ou moins disloquées.

Unité de cause.

Il est donc difficile de ne pas voir, dans les diverses espèces de phénomènes dont je viens de parler, les manifestations d'un même agent, dont le siége s'étend sous des pays entiers. Cet agent essentiel, c'est l'eau aidée de la chaleur à divers degrés, et à laquelle se joignent, comme causes secondaires, les émanations qui l'accompagnent.

Pour les volcans la chose est évidente; pour les filons métallifères il ne peut plus guère exister de doute, surtout après le travail de M. Élie de Beaumont et les expériences de M. de Sénarmont, et, pour ce qui est du métamorphisme, nous croyons notre assertion devenue extrêmement probable.

[1] Au moins ceux qui sont postérieurs au terrain silurien.

Ainsi nous pensons que l'eau agit sans cesse dans les régions profondes, après y avoir acquis des températures plus ou moins élevées, sous l'influence de la chaleur du globe. Son action est, sur certains points, *patente*, accusée qu'elle est par des volcans, des tremblements de terre, des soffionis, des sources thermales qui débouchent à la surface; sur d'autres points, *latente*, quand ces sources thermales, animées d'un mouvement ascensionnel, se perdent dans l'épaisseur des couches, ou quand l'eau de constitution seule des roches vient réagir sur elles et en produire le métamorphisme. Telle est la pensée qui m'a dicté l'épigraphe inscrite en tête de ce mémoire.

APPENDICE.

CONSIDÉRATIONS SUR LA FORMATION DES ROCHES SCHISTEUSES QUI ONT PRÉCÉDÉ LA PÉRIODE SILURIENNE.

Les schistes cristallins anciens se séparent souvent très-nettement du terrain silurien.

Au-dessous des terrains siluriens on ne connaît jusqu'à présent que des roches éminemment cristallines. En général, le passage est graduel des uns aux autres, mais quelquefois la ligne de démarcation est tout à fait tranchée, comme en Suède, en Finlande et aux États-Unis. Ainsi, les couches sédimentaires les plus anciennes (grès de Postdam) que présente cette dernière région du globe, n'ont subi aucune modification, et reposent horizontalement sur les terrains azoïques à feuillets verticaux [1].

Motifs qui ont fait considérer les terrains les plus anciens comme métamorphiques.

Des effets de l'action métamorphique se montrent, comme nous l'avons vu, dans les terrains de divers âges. Toutefois ce sont les couches les plus anciennes qui accusent le plus fortement cette action; de telle sorte que la cause qui l'a produite paraîtrait s'être affaiblie avec le temps et avoir possédé vraisemblablement, avant la période silurienne, une énergie considérable, c'est-à-dire s'être exercée plus près de la surface. Aussi comprend-on que beaucoup de géologues aient cru voir dans ces roches antésiluriennes les premières couches sédimentaires, mais qui auraient subi un métamorphisme.

Grande analogie de composition avec les terrains métamorphiques.

Cette supposition est appuyée par la grande ressemblance de ces roches anciennes avec celles des terrains stratifiés, dont l'origine métamorphique n'est pas mise en doute. Comme dans ces derniers, on trouve au milieu du gneiss, qui constitue la plus grande partie des terrains qui nous occupent, des calcaires, des dolomies, des schistes amphiboliques, des quartzites, des roches pétrosiliceuses (halleflinta des Suédois), des amas de minerais

[1] Foster et Whitney. *Aperçu de l'ensemble du terrain silurien du Lac Supérieur.* (*Bulletin de la Société géologique de France*, 2e série, t. VIII, p. 89.)

métalliques, que souvent on ne peut distinguer de ceux qu'on rencontre dans les couches supérieures. Cette ressemblance est si frappante pour les calcaires, en raison des minéraux qu'ils contiennent et de leur mode d'association, que l'on pourrait, par exemple, facilement confondre les calcaires cristallins à spinelle et chondrodite, subordonnés au gneiss de Pargas, en Finlande, ou du Canada, avec ceux de Monzoni, en Tyrol, et de la Somma, qui appartiennent à des terrains comparativement récents.

Vestiges charbonneux.

Comme autre trait d'analogie, il faut signaler encore le graphite ou les combinaisons charbonneuses que l'on rencontre dans ces plus anciens terrains[1] (graphite de Sainte-Marie-aux-Mines, anthracite de Kongsberg, en Norwège, ou de Dannemora, où il est dans un calcaire gris à peine cristallin, bitume des filons de granit de Finbo, près Fahlun, et de nombreux gîtes de fer de la Suède).

Autre hypothèse : son invraisemblance.

D'autres géologues, au contraire, frappés de la liaison intime qui existe entre le granit et ces gneiss, ont considéré ces derniers comme n'étant qu'un granit devenu schisteux par un étirement.

S'il en est ainsi, il faut nécessairement conclure que certaines masses de calcaire, de quartzite, de fer oxydulé et d'autres minerais métalliques préexistaient dans le granit, qu'elles y ont été ramollies en même temps que lui, de façon à pouvoir être étirées simultanément, et à prendre ainsi la forme de plaques parallèles aux feuillets de gneiss, imitant la stratification d'une manière frappante. C'est là une supposition bien difficile à admettre.

Il y a encore à faire sur ce sujet deux remarques importantes :

Les roches azoïques avaient acquis leur état cristallin antérieurement au dépôt du terrain silurien.

1° L'absence de transition des roches schisteuses azoïques au terrain silurien montre que les premières avaient déjà acquis leur état cristallin, antérieurement au dépôt des plus anciennes roches fossilifères connues. Ce fait est, d'ailleurs, confirmé par

[1] Tant que la synthèse, qui a déjà amené à des résultats si remarquables, entre les mains de M. Berthelot, n'aura pas imité les anthracites de Suède sans le secours de plantes, on doit croire que ces combustibles sont d'origine végétale, et, par conséquent, que les plantes existaient lorsque les gneiss qui renferment de ces dépôts se sont formés.

les galets de gneiss bien caractérisés que renferment quelquefois les terrains de transition.

2° Il n'y a pas d'apparence que ces mêmes roches anciennes aient jamais été, dans certaines contrées, recouvertes par une épaisseur considérable d'autres roches; autrement il faudrait admettre, et l'on n'est pas en droit de le faire, que des pays très-étendus et faiblement ondulés, comme la Scandinavie ou le Canada, ont subi des dénudations énormes.

Dans beaucoup de contrées elles n'ont jamais été recouvertes par une grande épaisseur d'autres terrains.

Des terrains, comme ceux que nous venons de prendre pour exemple en Suède et aux États-Unis, se rencontrent, d'ailleurs, dans toutes les régions du globe avec des caractères analogues; ils forment une sorte de revêtement presque universel sur le granit.

Ces roches forment un revêtement presque universel sur le granit.

En supposant la masse des mers répandue en vapeur dans l'atmosphère, la pression à la surface du globe devait être, au moins, deux cent cinquante fois ce qu'elle est aujourd'hui [1], et même davantage, à raison de l'intervention des gaz et des autres vapeurs; il n'a, par conséquent, pu exister d'eau liquide sur la terre avant que la température de sa surface se fût abaissée au-dessous du degré de chaleur qui peut donner à la vapeur d'eau une tension de deux cent cinquante atmosphères. La surface du globe était donc, à cette époque, à une température très-élevée, et s'il y existait des silicates, ils avaient été formés sans la coopération de l'eau liquide.

Action de l'eau sur le globe quand elle a commencé à se constituer à l'état liquide.

Mais plus tard, quand l'eau eut commencé à se constituer à l'état liquide, elle dut réagir sur ces silicates préexistants qui la supportaient, et donner ainsi naissance à toute une série de produits nouveaux. Par une véritable action métamorphique, l'eau de cet océan primitif, en pénétrant les masses fondues, en fit disparaître la nature première, et forma ensuite, de même que dans nos tubes, des minéraux cristallisés, au moyen des principes

[1] En admettant, avec M. de Humboldt, une profondeur moyenne de l'Océan de 3,500 mètres, on aurait, pour la couche d'eau répartie uniformément à la surface du globe, une épaisseur de 2,563 mètres, ce qui correspond à une pression de 248, soit, en nombre ronds, de 250 atmosphères.

mêmes qu'elle parvenait à dissoudre. Ces matières, formées ou suspendues au sein du liquide, devaient se précipiter sur son fond et produire des dépôts présentant des caractères différents à mesure que la chaleur du liquide diminuait.

Ère de la formation du granit et des roches cristallines.

Ces diverses périodes de décomposition et de recomposition chimique où intervient la voie humide, dans ces conditions extrêmes qui touchent à la voie sèche, sont-elles l'ère de la formation du granit et des roches schisteuses tout à fait azoïques et cristallines? On ne peut pas l'affirmer d'une manière absolue, mais on doit le présumer, surtout si l'on considère que, dans cette hypothèse, il a dû se former deux produits principaux, l'un tout massif, l'autre présentant des indices de sédimentation, et qui se lient l'un à l'autre d'une manière insensible; tel est précisément le cas du granit et du gneiss.

Dans tous les cas, on ne saurait contester que, s'il y a eu un moment où les roches étaient exclusivement sous l'empire de la voie sèche, elles sont passées sous le régime de la voie humide à une époque bien plus reculée qu'on ne l'avait admis jusqu'à présent : l'influence maintenant démontrée de l'eau sur la cristallisation des silicates ne permet plus de doute à cet égard.

Pourquoi les aérolithes manquent-elles de granit?

On ne trouverait peut-être pas aujourd'hui sur le globe de roches dont on puisse affirmer, en toute certitude, qu'elles aient été formées exclusivement par la voie sèche, sans aucun concours de l'eau. Cependant il est un exemple qui nous montre ce que pourraient être de semblables roches, et il nous est fourni par les aérolithes. Ces corps, en effet, n'offrent, dans leur constitution essentielle, ni eau, ni combinaison hydratée. N'est-il pas remarquable que, formés de silicates à bases identiques avec ceux de notre globe, ils n'aient jamais présenté ni quartz, ni mica, ni granit, et qu'on y trouve, au contraire, ce que l'on ne rencontre jamais dans l'écorce terrestre, du fer natif, des phosphures et des carbures métalliques, tous paraissant protester contre la présence de l'eau? N'est-ce pas là un nouveau motif, quoique tiré d'un peu loin, à la vérité, pour admettre la nécessité de l'interven-

tion de l'eau et l'impuissance de la chaleur seule à produire le granit?

Dans l'hypothèse que nous venons d'indiquer, les premiers dépôts seraient restés longtemps dans un état de mollesse éminemment favorable à la production de la structure schisteuse.

La structure schisteuse est très-fréquente dans ces plus anciens terrains.

Les feuillets des roches formées par ces dépôts, aussi bien que ceux des terrains métamorphiques moins anciens, ont en général une position voisine de la verticale, même en dehors des chaînes de montagnes, dans des contrées comme la Suède, le Limousin, la Moravie, dont le relief ne présente rien de particulier. D'après ce que nous avons dit plus haut sur la production de la structure feuilletée, les pressions latérales auxquelles cette structure paraît devoir son origine auraient agi à peu près horizontalement. Elles étaient donc probablement de même nature que les refoulements auxquels ont été dus ultérieurement, dans les terrains stratifiés plus solides, ces ploiements et contournements divers qui caractérisent les chaînes de montagnes. Ainsi les plus anciens terrains paraissent déjà témoigner de la force de contraction qui a produit plus tard ces chaînes, de même que la structure nerveuse du fer annonce les actions mécaniques qu'il a subies. Cette force s'est peut-être bornée, dans les premières époques, à produire la schistosité des couches, en même temps qu'en raison de leur état de mollesse, elle augmentait leur épaisseur par refoulement, en les ondulant à peine.

Elle accuse déjà une compression latérale comparable aux refoulements qui ont plus tard produit les chaînes de montagnes.

Quoi qu'il en soit des hypothèses auxquelles on se laisse facilement entraîner, tout en reconnaissant qu'elles n'ont pas de fondements suffisamment solides, il est incontestable que les gneiss anciens accusent évidemment la température élevée de la surface du globe dans ces périodes reculées; et que la production si universelle de roches cristallines dans ces terrains fondamentaux concourt, avec tout l'ensemble des phénomènes métamorphiques, à faire admettre qu'un refroidissement général s'est produit depuis dans les parties internes du globe. C'est un argument des plus positifs à opposer aux partisans exagérés des causes actuelles qui

Refroidissement des régions profondes du globe accusé par les terrains les plus anciens, comme par l'ensemble des phénomènes métamorphiques.

veulent, avec Hutton, que l'origine de notre planète se perde dans la nuit d'une période indéfinie, pendant laquelle les phénomènes géologiques n'auraient cessé de tourner dans le même cercle.

Unité dans les causes du métamorphisme, des roches éruptives et des dépôts de la mer primitive.

Bien que ces questions soient encore fort obscures, nous entrevoyons une grande simplicité et beaucoup d'uniformité dans les actions qui ont donné lieu à une si grande diversité d'effets; et les productions immédiates d'une mer surchauffée, la cristallisation des roches éruptives, le métamorphisme des couches stratifiées ne paraissent, pour ainsi dire, que les modes divers d'un même phénomène.

La formation des roches granitoïdes paraît devoir être éclaircie par l'expérience synthétique, plus que par l'observation directe.

Du reste, des conclusions moins vagues doivent être ajournées à l'époque, peu éloignée peut-être, où l'on arrivera à produire artificiellement le granit. L'expérience synthétique a déjà été fort utile depuis Hall, et c'est à elle qu'il paraît appartenir encore de jeter un rayon de lumière décisif sur une formation où l'observation directe n'a sans doute plus guère à nous apprendre.

Avenir probable de l'expérimentation dans l'étude des phénomènes géologiques de tout ordre.

Si l'expérimentation, armée de ses procédés les plus ingénieux, a été nécessaire pour nous conduire à l'intelligence des phénomènes les plus rapprochés de nous, et dont nous sommes témoins à chaque instant, tels que la pesanteur de l'air, la foudre, etc. combien, à plus forte raison, ne devrons-nous pas être forcés d'y recourir quand il s'agit des faits géologiques, dont les plus importants ne se répètent plus de nos jours, du moins sous nos yeux, et ont laissé pour témoin unique un résultat final, ne conservant plus aucune trace des actions intermédiaires qui l'ont produit! Jusqu'à la fin du siècle dernier, la géologie avait été tout à fait hypothétique; elle est entrée alors dans une voie positive, où elle a eu constamment pour guides l'observation des faits et l'induction. Elle a enfin abordé une nouvelle période où elle s'éclairera dans ses phénomènes de tout ordre, chimiques, physiques et mécaniques, par l'expérimentation synthétique, subissant ainsi des phases analogues à celles que la physique a traversées pour arriver, de l'état où la prit Galilée, au point où nous la voyons aujourd'hui.

TABLE DES MATIÈRES.

Pages.

INTRODUCTION 1

PREMIÈRE PARTIE.

HISTORIQUE.

CHAPITRE Ier. État de la géologie à l'apparition du système de Hutton 4

CHAPITRE II. Système de Hutton 8

CHAPITRE III. Successeurs de Hutton 13

CHAPITRE IV. Travaux relatifs aux autres actions que l'intérieur du globe fait subir à son revêtement interne, et qui se rattachent au métamorphisme 23

§ 1er. Éruptions des volcans ..... *Ibid.*

§ 2. Roches éruptives 25

§ 3. Formation des gîtes métallifères 26

§ 4. Dislocations mécaniques de l'écorce terrestre 27

§ 5. Chaleur interne du globe démontrée par des mesures directes 29

CHAPITRE V. Modifications survenues depuis Hutton dans les idées relatives au métamorphisme 30

CHAPITRE VI. Métamorphisme de structure 38

CHAPITRE VII. Mention des autres principaux observateurs qui se sont occupés du métamorphisme 41

CHAPITRE VIII. Histoire des expériences synthétiques pouvant éclairer la question du métamorphisme 43

§ 1er. Fusion et refroidissement des roches 44

§ 2. Examen des cristaux obtenus accidentellement dans les ateliers métallurgiques 45

§ 3. Expériences synthétiques par fusion simple ou de mélanges divers ..... *Ibid.*

Pages.

§ 4. Expériences synthétiques à l'aide de vapeurs réagissant entre elles ou sur des corps fixes..... 48
§ 5. Voie humide..... 50

IIe PARTIE.

EXPOSÉ DES FAITS ACQUIS DONT L'ENSEMBLE CONSTITUE LE MÉTAMORPHISME.

CHAPITRE Ier. Métamorphisme de juxtaposition..... 54
CHAPITRE II. Métamorphisme régional..... *Ibid.*
CHAPITRE III. Métamorphisme de structure..... 65
CHAPITRE IV. Dolomie, gypse, sel gemme, soufre et dépôts bitumineux, dans leurs rapports avec le métamorphisme..... 67
CHAPITRE V. Gîtes métallifères dans leur relation avec le métamorphisme.. 73
CHAPITRE VI. Décomposition des roches silicatées et sources minérales..... 74

IIIe PARTIE.

CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES SUR LA CAUSE DES PHÉNOMÈNES MÉTAMORPHIQUES : EXPÉRIENCES SYNTHÉTIQUES À L'APPUI.

CHAPITRE Ier. La chaleur interne; ses effets sur le métamorphisme; elle ne suffit pas pour expliquer tous les phénomènes..... 78
CHAPITRE II. De certaines vapeurs considérées comme auxiliaires de la chaleur; leur action, combinée à celle de la chaleur, est encore insuffisante..... 82
CHAPITRE III. De l'eau considérée comme agent de métamorphisme..... 85
CHAPITRE IV. Expériences sur l'action exercée dans la formation des silicates par l'eau surchauffée..... 88
CHAPITRE V. Déductions tirées de ces expériences et applicables à la cristallisation des roches silicatées, éruptives et métamorphiques.. 95
CHAPITRE VI. Métamorphisme contemporain de Plombières..... 98
CHAPITRE VII. Conséquences à tirer des faits reconnus à Plombières..... 102
CHAPITRE VIII. Autres particularités du métamorphisme expliquées à l'aide des faits mentionnés dans les chapitres IV et VI..... 104
CHAPITRE IX. Application des mêmes faits aux roches éruptives..... 108
CHAPITRE X. Métamorphisme de structure; ses relations avec le métamorphisme ordinaire..... 111

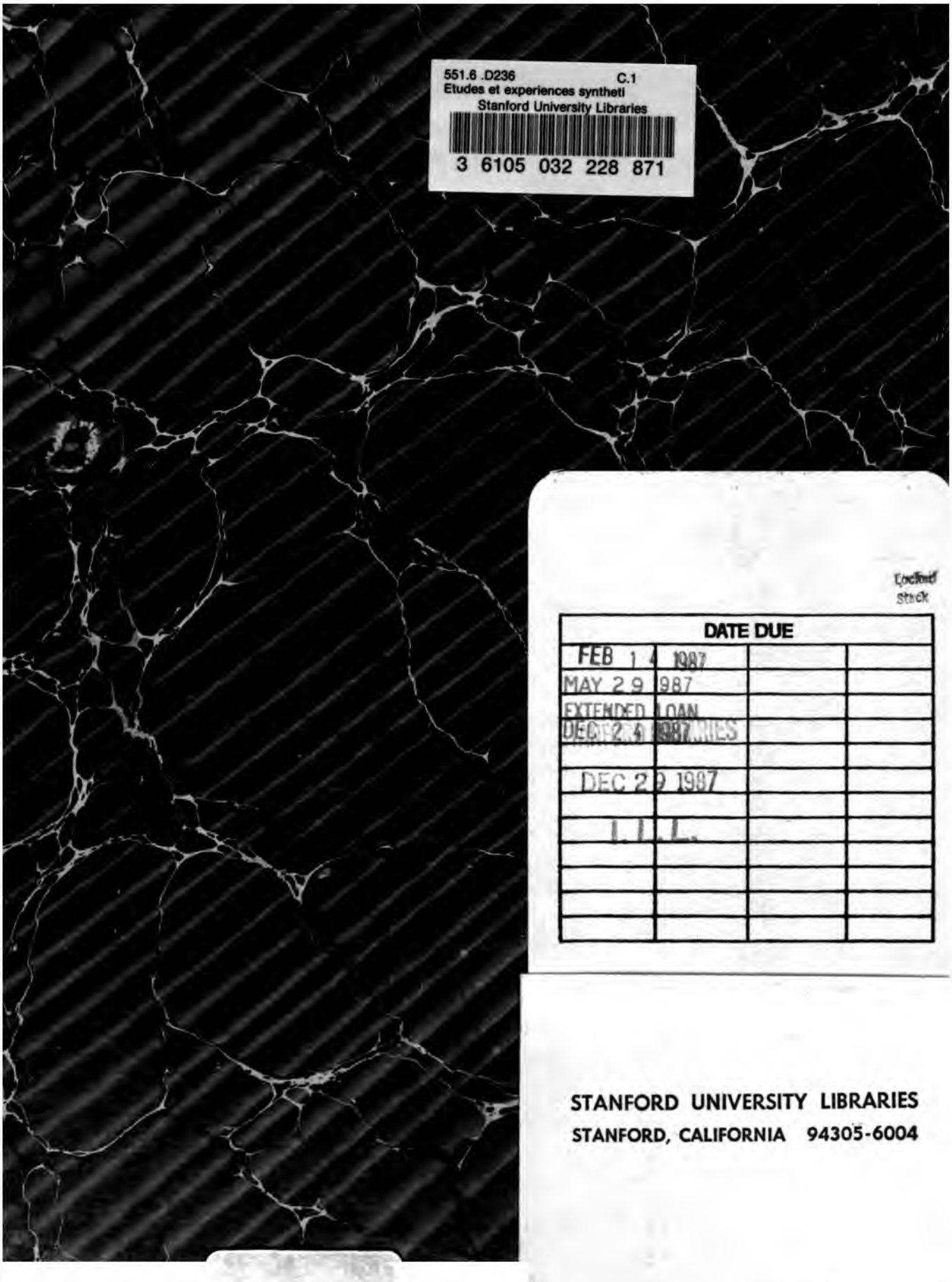
Pages.

CHAPITRE XI. Rapprochement de tous les phénomènes dont le siége est dans la profondeur 116

APPENDICE.

Considérations sur la formation des roches schisteuses qui ont précédé la période silurienne 119

FIN.



551.6 .D236 C.1
Etudes et experiences syntheti
Stanford University Libraries
3 6105 032 228 871

Lockout
Stack

DATE DUE			
FEB 14 1987			
MAY 29 1987			
EXTENDED LOAN			
DEC 24 1987			
DEC 29 1987			
L.L.L.			

STANFORD UNIVERSITY LIBRARIES
STANFORD, CALIFORNIA 94305-6004